

**Caracterização Experimental das Propriedades
Diferidas e de Durabilidade de Betões com
Reduzida Dosagem de Cimento**

Tese apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil

Especialização em Construção Urbana

Autor

Luís Carlos Ricardo Carvalho

Orientador

Prof. Doutor Hugo Sérgio Sousa Costa

Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Prof. Doutor Eduardo Nuno Brito Santos Júlio

Professor Catedrático do Dep. de Eng. Civil, Arquitetura e Georecursos
Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa

Coimbra, dezembro, 2016

RESUMO

A produção de betões mais ecológicos e económicos tem sido conseguida, até à data, substituindo parcialmente o cimento Portland por subprodutos de outras indústrias. Com o desenvolvimento contínuo da ciência e tecnologia dos betões, a obtenção de betões mais ecológicos poderá ser alcançada reduzindo as quantidades de cimento usadas.

O estudo de otimização granulométrica, com o objetivo de aumentar a compacidade das misturas, e a utilização de adições como substituto de cimento permite desenvolver betões com baixas dosagens de cimento e bom desempenho mecânico.

A presente dissertação foca-se no estudo das propriedades diferidas e de durabilidade de betões com baixas dosagens de cimento – *low cement concrete* (LCC). Os principais objetivos consistem em inferir a influência da redução do cimento, averiguar a ação das adições de fíler calcário e de cinzas volantes nas misturas, e ainda, constatar qual a influência de formular as misturas por diferentes curvas de referência, Faury e Alfred, nas referidas propriedades do betão.

Sucintamente verifica-se que os betões com baixas dosagens de pasta ligante apresentam trabalhabilidade e coesão inferiores às dos betões com dosagens normais. No estado endurecido, os betões com baixas dosagens de ligante apresentam menores valores de retração e de fluência. Relativamente à porosidade, os coeficientes de absorção de água são também inferiores. A análise dos resultados demonstrou que é possível formular um betão com apenas 175 kg/m³ de cimento com resistência e durabilidade superior a betões com 250 kg/m³ de cimento.

Palavras-chave:

Betão com baixa dosagem de cimento, sustentabilidade, redução de cimento, adições, trabalhabilidade, fluência, retração, capilaridade, imersão, carbonatação.

ABSTRACT

The production of a more economic and ecologic concrete has been made, until now, by replacing a percentage of Portland cement by industry byproducts. With the continuous development of concrete science and technology, it might be possible to obtain a more ecological concrete by reducing the amount of used cement.

The study of granulometric optimization, aiming to obtain mixtures with higher packing density, and the utilization of additions as cement replacement allows to develop concrete with low cement dosage.

The present dissertation consists in evaluating the durability properties of low cement concrete (LCC). The main goals comprised to identify the influence of reducing the amount of cement, to evaluate action of limestone filler and fly ash additions to concrete and, to study the influence of designing mixtures with different reference curves, Faury and Alfred, on the properties of concrete.

In a brief way, the concrete with lower dosage of paste volume presented lower workability and cohesion when compared with ordinary concrete. In the hardened stage, concrete with lower dosage of paste volume presented lower shrinkage and creep, as well as lower water absorption coefficient, in comparison to ordinary concrete.

Subsequently, the results analysis showed that is possibly to design concrete using only 175 kg/m³ of cement and obtain higher durability and strength performance then a ordinary concrete with 250 kg/m³ of cement dosage.

Keywords:

Low cement concrete, cement reduction, additions, sustainability, workability, creep, shrinkage, capillarity, immersion, carbonation.

Índice Geral

Resumo	I
Abstract.....	II
Índice Geral.....	III
Índice de Figuras	VII
Índice de Tabelas	IX
Simbologia.....	XI
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estrutura	3
2. Betões com Baixa Dosagem de Cimento.....	5
2.1. Introdução	5
2.2. Betões de baixa dosagem de cimento.....	5
2.3. Durabilidade e vida útil do betão.....	6
2.4. Capilaridade e Absorção	7
2.5. Carbonatação.....	13
2.6. Fluência.....	17
2.7. Retração.....	19
3. Materiais	21
3.1. Introdução	21
3.2. Cimento Portland.....	21
3.3. Agregados.....	23
3.4. Adições	26
3.4.1. Fíler calcário	27
3.4.2. Sílica de fumo	27
3.4.3. Escórias de alto forno.....	28

3.4.4.	Cinzas volantes.....	29
3.5.	Adjuvantes	30
3.6.	Água.....	31
4.	Programa Experimental	33
4.1.	Materiais utilizados.....	33
4.1.1.	Agregados	33
4.1.2.	Ligantes	34
4.1.3.	Adições.....	34
4.1.4.	Adjuvantes	35
4.1.5.	Água de amassadura	35
4.2.	Realização e cura dos provetes.....	36
4.3.	Composições estudadas	38
4.4.	Ensaio no estado fresco	40
4.4.1.	Ensaio de abaixamento	40
4.4.2.	Grau de compactabilidade	41
4.5.	Ensaio no estado endurecido	42
4.5.1.	Ensaio de capilaridade	42
4.5.2.	Ensaio de imersão	44
4.5.3.	Ensaio de carbonatação	44
4.5.4.	Módulo de elasticidade.....	46
4.5.5.	Ensaio de retração	46
4.5.6.	Ensaio de fluência	47
5.	Análise de Resultados	49
5.1.	Caracterização do betão no estado fresco	49
5.1.1.	Ensaio de abaixamento	49

5.1.2.	Grau de compactabilidade	50
5.2.	Caracterização do betão no estado endurecido	51
5.2.1.	Resistência à compressão	52
5.2.2.	Capilaridade	55
5.2.3.	Imersão	57
5.2.4.	Carbonatação	58
5.2.5.	Módulo de elasticidade	63
5.2.6.	Retração	63
5.2.7.	Fluência	66
6.	Conclusões	71
6.1.	Conclusões	71
6.2.	Estudos futuros	73
	Referências bibliográficas	75

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA RAZÃO A/C E CURA NA REDE POROSA CAPILAR. (COUTINHO M. , 2005)	9
FIGURA 2 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DE PERMEABILIDADE E POROSIDADE. (COUTINHO M. , 2005)	10
FIGURA 3 - MODELO DA ESTRUTURA DA PASTA DE CIMENTO. (COUTINHO M. , 2005)	10
FIGURA 4 - FENÓMENO DE CAPILARIDADE. (FREITAS, TORRES, & GUIMARÃES, 2008)	12
FIGURA 5 - QUALIDADE DO BETÃO EM FUNÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO S. (COUTINHO M. , 2005)	13
FIGURA 6 - CORROSÃO DAS ARMADURAS DEVIDO À CARBONATAÇÃO DO BETÃO. (GROSGOGÉAT & COLON, 2008)	16
FIGURA 7 - ENSAIO DE FENOLFTALEÍNA (WIKIPÉDIA)	17
FIGURA 8 - DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE FLUÊNCIA DE BETÃO NUM AMBIENTE INTERIOR PELO EC2 (EC2,2010)	18
FIGURA 9 - DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE FLUÊNCIA DE BETÃO NUM AMBIENTE EXTERIOR PELO EC2. (EC2, 2010)	18
FIGURA 10 - EFEITO DA DIMENSÃO MÁXIMA DO AGREGADO GROSSO E DA RAZÃO A/C NA RESISTÊNCIA DO BETÃO,(COUTINHO, 1999)	25
FIGURA 11 - IMAGEM MICROSCÓPICA DE SÍLICA DE FUMO (LI, 2011)	28
FIGURA 12 - AMOSTRA DE SÍLICA DE FUMO (COSTA H.S, 2007)	28
FIGURA 13 - IMAGEM MICROSCÓPICA DE ESCORAS DE ALTO FORNO (LI,2011)	28
FIGURA 14 - AMOSTRA DE ESCÓRIAS DE ALTO FORNO (COSTA H.S, 2007)	28
FIGURA 15 - IMAGEM MICROSCÓPICA DE CINZAS VOLANTES (LI,2011)	29
FIGURA 16 - AMOSTRA DE CINZAS VOLANTES (COSTA H.S, 2007)	29
FIGURA 17 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS	34
FIGURA 18 - FICHA TÉCNICA MASTER GLENIUM SKY 526 DA BASF	35
FIGURA 19 - RESISTÊNCIA DO TANQUE DE CURA DOS PROVETES	36
FIGURA 20 - TANQUE DE CURA DOS PROVETES	36
FIGURA 21 - CÂMARA TERMO-HIGROMÉTRICA	37
FIGURA 22 - ENCHIMENTO DE PROVETES	38
FIGURA 23 - ENSAIO DE ABAIXAMENTO	40
FIGURA 24 - DESAGREGAÇÃO DO BETÃO POR FALTA DE COESÃO	41
FIGURA 25 - BETÃO COMPACTADO NA MESA VIBRATÓRIA	42
FIGURA 26 - COLOCAÇÃO DOS PROVETES EM RECIPIENTE PLÁSTICO	43
FIGURA 27 - MEDIÇÕES ENSAIO DE CAPILARIDADE	43
FIGURA 28 - CÂMARA PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE CARBONATAÇÃO	44
FIGURA 29 - VAPORIZAÇÃO DE SOLUÇÃO ALCOÓLICA DE FENOLFTALEÍNA 0.1%	45
FIGURA 30 - IMPERMEABILIZAÇÃO DOS TOPOS DOS PROVETES	45
FIGURA 31 - REAÇÃO DO BETÃO À SOLUÇÃO ALCOÓLICA DE FENOLFTALEÍNA 0.1%	45
FIGURA 32 - MEDIÇÃO DA EXTENSÃO PARA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE	46
FIGURA 33 - ENSAIO DE RETRAÇÃO	47
FIGURA 34 - PROVETES CARREGADOS PARA DETERMINAÇÃO DA FLUÊNCIA	48

FIGURA 35 - ABAIXAMENTO OBTIDO NO ENSAIO DE SLUMP	50
FIGURA 36 - GRAU DE COMPACTABILIDADE OBTIDO NO ENSAIO DE COMPACTABILIDADE	51
FIGURA 37 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS (ALVES, 2015).	52
FIGURA 38 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS (ALVES, 2015).	53
FIGURA 39 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 56 DIAS (ALVES, 2015).	53
FIGURA 40 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS PROVETES CÚBICOS DE BETÃO LC75 E LC75F (ALVES, 2015)	54
FIGURA 41 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS PROVETES CÚBICOS DE BETÃO LC125 E LC125F (ALVES, 2015)	54
FIGURA 42 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS PROVETES CÚBICOS DO BETÃO LC175 E LC175F (ALVES, 2015).....	54
FIGURA 43 - ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	55
FIGURA 44 - ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE ÀS 72H	56
FIGURA 45 - QUANTIDADE DE ÁGUA ABSORVIDA POR IMERSÃO	57
FIGURA 46 - PROVETES DE BETÃO VAPORIZADOS COM FENOLFTALEÍNA AO FIM DE 3,7,14 E 42 DIAS.	60
FIGURA 47 - EVOLUÇÃO DA PROFUNDIDADE DA CARBONATAÇÃO.....	61
FIGURA 48 - PROFUNDIDADE DA CARBONATAÇÃO AOS 42 DIAS	61
FIGURA 49 - RELAÇÃO ENTRE CAPILARIDADE E CARBONATAÇÃO	62
FIGURA 50 - MÓDULO DE ELASTICIDADE DO BETÃO AOS 28 DIAS	63
FIGURA 51 - RESULTADOS OBTIDOS DO ENSAIO DE RETRAÇÃO NOS BETÕES LC	64
FIGURA 52 - RESULTADOS OBTIDOS DO ENSAIO DE RETRAÇÃO NOS BETÕES C.	64
FIGURA 53 - RESULTADOS OBTIDOS DO ENSAIO DE RETRAÇÃO NOS BETÕES LC E C.	65
FIGURA 54 - PREVISÕES DA RETRAÇÃO SEGUNDO EC2.....	65
FIGURA 55 - RESULTADOS DO ENSAIO DE FLUÊNCIA DE TODOS OS BETÕES.	67
FIGURA 56 - RESULTADOS DO ENSAIO DE FLUÊNCIA DOS BETÕES LC E DO BETÃO C250	68
FIGURA 57 - RESULTADOS DO ENSAIO DE FLUÊNCIA DOS BETÕES LC_F E DO BETÃO C250	68
FIGURA 58 - RESULTADOS DO ENSAIO DE FLUÊNCIA DOS BETÕES LC E LC_F	69
FIGURA 59 - DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE FLUÊNCIA PELO EC2.....	70

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - CLASSES DE RISCO AMBIENTAL. (NP EN 206, 207).....	7
TABELA 2 - CONSTITUINTES DO CLÍNQUER, (KOHLEHAAS, 1983).....	22
TABELA 3 - REQUISITOS MECÂNICOS DO CIMENTO. (ALVES, 2015), (NP EN 197-1, 2001)	23
TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS E VERIFICAÇÃO DA CONFORMIDADE DOS AGREGADOS DE COM A E 373 DO LNEC.....	26
TABELA 5 - AGREGADOS UTILIZADOS.	33
TABELA 6 - MASSA VOLUMICA DOS AGREGADOS	33
TABELA 7 - MASSAS VOLUMICAS DAS ADIÇÕES.....	35
TABELA 8 - COMPOSIÇÕES DOS BETÕES REALIZADOS: DOSAGENS EM KG/M ³	39
TABELA 9 - CLASSE DE CONSISTÊNCIA	41
TABELA 10 - RESULTADOS OBTIDOS PELO ENSAIO DE SLUMP.....	49
TABELA 11 - RESULTADOS OBTIDOS ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO GRAU DE COMPACTABILIDADE	51
TABELA 12 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS PROVETES CÚBICOS DOS BETÕES LC E C. (ALVES, 2015)	52
TABELA 13 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS PROVETES CÚBICOS DOS BETÕES LC E LC_F (ALVES, 2015)	53
TABELA 14 - EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE AO LONGO DO TEMPO	55
TABELA 15 - QUANTIDADE DE ÁGUA ABSORVIDA POR IMERSÃO (%).....	57
TABELA 16 - RESULTADOS PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO (MM)	60
TABELA 17 - MÓDULO DE ELASTICIDADE DO BETÃO AOS 28 DIAS.	63

SIMBOLOGIA

Abreviaturas

- LCC – Betões com reduzidas dosagens de cimento - low cement concrete
- C – Betão formulado pela curva de referência de Faury, com uma dosagem de pasta ligante corrente (350 kg/m³).
- EC2 – Eurocódigo 2
- HR – Humidade relativa
- LTNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- LC – Betão formulado pela curva de referência de Alfred, com uma baixa dosagem de pasta ligante (250 kg/m³) e com relação A/L = 0,47.
- LC_A – Betão formulado pela curva de referência de Alfred, com uma baixa dosagem de pasta ligante (250 kg/m³) e com relação A/L = 0,72.
- LC_F – Betão formulado pela curva de referência de Faury, com uma baixa dosagem de pasta ligante (250 kg/m³) e relação A/L = 0,47.

Gregas

- ϵ_{fl} – deformação por fluência
- ϵ_i – deformação instantânea
- ϵ_s – retração por secagem
- ϵ_{min} – extensão do provete quando aplicado uma tensão de 0,5 MPa
- $\epsilon_{máx}$ – extensão do provete quando aplicado uma tensão igual a 1/3 da sua resistência máxima
- σ – tensão por compressão
- σ_{min} – tensão mínima, 0,5 MPa, aplicada no provete durante a determinação do módulo de elasticidade
- $\sigma_{máx}$ – tensão máxima, 1/3 da sua resistência máxima, aplicada no provete durante a determinação do módulo de elasticidade
- μm – micron = 1×10^{-6} (m)
- ρ – massa específica do fluído (kg/m³)
- ν – viscosidade dinâmica do fluído (N.s/m²)
- φ – coeficiente de fluência
- $\varphi(\infty, t_0)$ – coeficiente de fluência a longo prazo
- $\varphi(t)$ – fluência para uma determinada idade t

Latinas

A	–	dosagem ponderal de água
A/(C+CV)	–	relação ponderal água efetiva/(cimento + cinzas volantes)
A/L	–	relação ponderal água efetiva/ligante
A/C	–	relação ponderal água efetiva/cimento
Adj	–	dosagem ponderal de adjuvante
AF0/3	–	areia fina 0/3 mm
Ag	–	dosagem ponderal de agregados
Ca(OH) ₂	–	hidróxidos de cálcio
CO ₂	–	dióxido de carbono
C2S	–	silicato bicálcico
C2(A,F)	–	ferrite
C3A	–	aluminato tricálcico
C3S	–	silicato tricálcico
Ec	–	módulo de elasticidade por compressão
E	–	módulo de elasticidade
H ₂ O	–	água
H ₂ CO ₃	–	ácido carbónico
°C	–	grau Célsio
<i>f_{cm,t}</i>	–	valor médio da tensão de rotura à compressão do betão à idade t

1. Introdução

1.1. Enquadramento

O desenvolvimento e bem-estar de toda a sociedade moderna é assente, entre outros aspetos, em construções com elementos de betão. As pontes, os edifícios, as barragens, assim como tantos outros equipamentos que constituem as nossas cidades têm como principal material o betão. Até à data, o betão foi o material mais utilizado na construção civil e assim se manterá até se desenvolver um novo material, económico, trabalhável, versátil e durável como o betão.

O aparecimento de ligante hidráulico de base cimentícia, ao contrário do que geralmente se possa pensar, não é um material recente. As primeiras utilizações de ligante hidráulico de base cimentícia que se tem conhecimento remonta à época Romana. Os Romanos observaram no monte Vesúvius a existência de um pó que, ao entrar em contato com a água do mar, formava um ligante de elevada coesão e resistência. Esse ligante tinha a particularidade de não se dissolver na água. Observado o fenómeno, os Romanos juntaram esse pó, a pozolana, à cal e agregados naturais que normalmente usavam nas suas construções, criando assim a base do primeiro betão.

Com o fim do império Romano esse conhecimento foi-se perdendo, sendo novamente explorado na França e em Inglaterra durante os anos de 1800. Desde então a sociedade moderna tem estudado a ciência dos betões, desenvolvendo vários tipos de betões como, por exemplo, os betões leves, betões de alta resistência, betões auto-compactáveis e tantos outros ajustados às necessidades específicas que surgem.

Na presente década, em que a Humanidade se depara com o fim de energia barata, com o problema das alterações climáticas, com a acumulação excessiva de carbono na atmosfera terrestre, surge a necessidade de aumentar a eficiência e reduzir a sua pegada.

É neste contexto que surge a janela de oportunidade para se desenvolver na indústria da construção civil um novo tipo de betão, um betão mais sustentável, um betão com baixas dosagens de cimento.

1.2. Objetivos

Importa salientar que a componente experimental da presente tese foi desenvolvida em paralelo com a de outra tese, focada na formulação e caracterização das propriedades mecânicas de LCC.

Os objetivos estabelecidos para o desenvolvimento da tese foram:

- Produzir misturas de LCC variando os principais parâmetros de composição, designadamente, a compacidade e a relação A/L, a dosagem de cimento com substituição parcial por adições e, a curva granulométrica de referência;
- Relacionar a dosagem de cimento e a resistência mecânica do betão com a evolução e amplitude da retração e da fluência;
- Avaliar a influência da compacidade das misturas no desenvolvimento da retração e da fluência, assim como nas restantes propriedades do betão;
- Relacionar a dosagem de cimento das misturas com a velocidade de carbonatação;
- Identificar variações na velocidade de carbonatação dependentes da compacidade, da relação A/L e das adições utilizadas;
- Relacionar a percentagem de cimento utilizado com a absorção de água por imersão e capilaridade no betão;
- Relacionar a absorção de água e a capilaridade com a profundidade de carbonatação;
- Verificar a influência da formulação das amassaduras pela curva de referência de Faury e Alfred na fluência do betão;
- Comparar os resultados experimentais com as previsões do EC2, para a retração e a fluência.

1.3. Estrutura

A presente dissertação é dividida em 6 capítulos:

No primeiro capítulo é exposto o contexto em que surge a necessidade de desenvolver este trabalho. São ainda apresentados os objetivos a atingir e a organização do documento.

A revisão bibliográfica é apresentada no segundo capítulo, onde é compilada informação relativa à investigação desenvolvida até à data na área dos betões, principalmente dos LCC, materializando a base teórica e tecnológica que define o ponto de partida para o desenvolvimento do trabalho de investigação.

O capítulo três consiste na descrição e identificação das características dos materiais utilizados na produção do betão, em particular do LCC.

No capítulo número quatro é apresentado todo o programa experimental realizado, a caracterização dos materiais usados nas amassaduras, a realização e cura dos provetes, os ensaios e a metodologia de caracterização.

O penúltimo capítulo, o quinto, consiste na apresentação e análise dos resultados obtidos. São ainda apresentadas as comparações entre os valores previstos teoricamente e os obtidos experimentalmente.

As conclusões resultantes são apresentadas no sexto e último capítulo, no qual são ainda identificados os principais pontos que carecem de futuros estudos.

2. Betões com Baixa Dosagem de Cimento

2.1. Introdução

Estima-se que a produção de uma tonelada de cimento Portland seja responsável pela produção de 1 tonelada de CO_2 . Sendo o betão o segundo material mais consumido globalmente, imediatamente a seguir à água (Worrell, Price, Martin, Hendriks, & Meida, 2011), deduz-se que a produção de cimento Portland seja responsável por 7% das emissões de CO_2 em todo o mundo. A crescente preocupação ambiental e as políticas de sustentabilidade introduzidas pelos governos, de modo a minimizar o impacto ambiental que o consumo de cimento apresenta, incentivaram o desenvolvimento de novas tecnologias na área dos betões (Fennis & Walraven, 2012). Uma maneira de reduzir as emissões de CO_2 resultantes do consumo de betão é diminuindo a percentagem de cimento utilizado na sua produção. É também possível substituir uma determinada percentagem de cimento por adições como: fíleres, cinzas volantes, escoras de alto-forno, entre outras, que são subprodutos resultantes de outras indústrias.

2.2. Betões de baixa dosagem de cimento.

O desenvolvimento de um betão com uma baixa dosagem de cimento é conseguido numa primeira abordagem à custa da substituição de cimento por subprodutos de outras indústrias.

A adição de fíler calcário, cinzas volantes, escórias de alto forno ou sílica de fumo ao cimento Portland é frequente. Estudos realizados e a vasta experiência adquirida ao longo dos anos demonstram resultados satisfatórios.

Na presente década tecnológica, onde a modelação computacional encontra-se patente nas mais vastas áreas, surge o desenvolvimento de modelação da formulação de misturas de betão. Esses modelos permitem simular, através das curvas granulométricas dos agregados que se dispõe, as percentagens a utilizar de cada agregado de forma a obter-se a maior compacidade possível da mistura. Refira-se que a compacidade é o volume da parte sólida do betão por unidade de volume aparente do mesmo (S A A M Fennis, 2011).

Um arranjo entre partículas onde o volume de vazios é mínimo permite uma diminuição da água necessária e de pasta ligante (Sonja A A M Fennis, Walraven, & Uijl, 2009).

O desenvolvimento de um betão de baixa dosagem de cimento deve ter como pontos de partida as seguintes considerações:

- Uso de cimento com uma elevada classe de resistência;
- Optimização do volume da pasta ligante;
- Minimização do volume de água utilizado na amassadura
- Optimização da curva granulométrica dos agregados

Outro ponto relevante é a dispersão do cimento utilizado por metro cúbico de betão que deve ser maximizado. Tal é possível com o uso de um superplastificante que funciona como um agente dispersor, garantindo que o cimento e as adições sejam distribuídos uniformemente na matriz. A introdução de adições nas misturas tem como consequência um aumento da sua densidade. Estes preenchem os vazios existentes entre as partículas de maior dimensão, levando ao aumento da compacidade.

O estudo de otimização da distribuição das partículas em função das suas dimensões faz com que a densidade da mistura aumente. Essa otimização da distribuição das partículas permite uma redução do rácio água/cimento (A/C), alcançando-se um aumento de resistência e durabilidade do betão (Proske , Hainer, Rezvani, & Graubner, 2014).

O betão com baixa dosagem de pasta ligante tem a característica de ser um betão com pouca coesão e uma baixa trabalhabilidade. Esse fator dificulta a sua aplicação em obras correntes, embora seja mais fácil de aplicar em elementos que requerem volume significativo de betão nos quais seja simples a compactação com vibradores de elevada potência.

2.3. Durabilidade e vida útil do betão

Durante a fase de projeto de uma estrutura de betão é estabelecida a sua vida útil. A vida útil de uma estrutura é o período durante o qual essa satisfaz os requisitos de segurança, funcionalidade e estéticos sem custos de manutenção não previstos (Coutinho M. , 2005).

Nos primórdios do desenvolvimento da indústria do betão, este material era associado a uma ideia de eternidade e não havia conhecimento dos processos de degradação do betão, sendo resistência mecânica o único requisito especificado.

Atualmente o paradigma mudou, o estudo dos processos de degradação do betão permitiu estabelecer requisitos mínimos, além da resistência mecânica.

A regulamentação atual considera várias classes de exposição ambiental, dependendo das condições climáticas e meios onde o betão será colocado. A norma (NP EN 206, 207) define 6 classes de exposição ambiental em que cada classe é subdividida dependendo do grau de agressividade, Tabela 1. Ainda na mesma norma são definidos os requisitos mínimos de dosagens de cimento, razões a/c e teor mínimo de ar no betão fresco dependendo da classe de exposição ambiental.

Tabela 1 - Classes de risco ambiental. (NP EN 206, 207)

Classe	Tipo de risco
X0	Sem risco de corrosão ou ataque
XC1 a XC4	Corrosão induzida por carbonatação
XD1 a XD3	Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar
XS1 a XS3	Corrosão induzida por cloretos da água do mar
XF1 a XF4	Ataque pelo gelo/degelo com ou sem produtos descongelantes
XA1 a XA3	Ataque químico

2.4. Capilaridade e Absorção

A durabilidade de um betão está diretamente ligada à capacidade que esse apresenta em resistir à penetração de gases e substâncias que se encontram presentes no meio envolvente. É de acordo geral que essa capacidade de resistir depende da estrutura interna da matriz do betão (pasta ligante) e não tanto dos agregados utilizados. Isso deve-se ao facto de os agregados serem praticamente inertes e apresentarem uma porosidade aberta muito baixa.

A matriz ligante de base cimentícia é constituída por: cimento Portland, adições, água, adjuvantes, ar e areia. A água utilizada na produção de um betão é geralmente superior à necessária para que ocorram todas as reações de hidratação do cimento. Sendo mais específico, a massa de água necessária para hidratar o cimento corresponde a 23% da massa do cimento anidro, (Coutinho M. , 2005). O excesso de água tem como finalidade garantir a

trabalhabilidade necessária à bombagem e compactação do betão. Durante a execução e colocação do betão ocorre o aprisionamento de pequenas bolhas de ar na sua matriz. Essas bolhas de ar são responsáveis pela formação da estrutura porosa do betão. A evaporação da água em excesso (não utilizada nas reações de hidratação do betão) durante a cura do betão também é responsável pela formação de uma extensa rede porosa no interior do betão. (Coutinho M. , 2005)

Em determinadas situações a existência de porosidade é benévola, por exemplo: em alguns países onde se atingem temperaturas bastante baixas é frequente incorporar ar nos betões, assim a água que se encontra no interior dos betões ao congelar terá espaço para expandir, não comprometendo a integridade do betão quando sujeito ao gelo-degelo. (Kurdowski, 2013)

As reações químicas de hidratação de um betão são reações exotérmicas e consequentemente contribuirão para o aumento da temperatura no interior do betão fresco. Com o aumento da temperatura, a água existente no interior do betão sofre um aumento de volume. Caso esse aumento de temperatura não se dê de forma lenta, de modo a que a água tenha tempo para sair do interior do betão, poderá ocorrer um aumento da pressão da água no interior do mesmo. Esse aumento de pressão será responsável pela formação de microfissuras responsáveis pelo aumento da permeabilidade e pela diminuição das resistências dos betões (Siddiqui, Grasley, & Fowler, 2016).

O processo de cura do betão é uma fase na qual se deve dar grande foco. A rápida evaporação de água do betão, quando as betonagens ocorrem em condições climáticas adversas (incidência solar direta, calor extremo ou vento intenso), provocará uma rápida e excessiva movimentação de água do interior do betão para o exterior. Essa saída rápida da água irá provocar a formação de microfissuras e uma elevada porosidade. A consequência será, então, um betão com menor resistência e durabilidade final (Schlumpf , Bicher, & Schwoon, 2003).

É importante referir que o movimento de água que se encontra no interior do betão para o exterior é mais rápido nos primeiros instantes. Parte dessa água fica retida na estrutura interna do betão porque ao desenvolverem-se as reações de hidratação do cimento vai ocorrer uma colmatação dos poros capilares, inicialmente formados, que realizavam a ligação ao exterior. A razão pela qual um betão continua a ganhar resistência a longo prazo deve-se ao facto de essas moléculas de água retidas no interior desses poros continuarem a reagir com os compostos do

cimento hidratado, formando novos cristais. Esses novos cristais vão diminuir a porosidade e contribuir assim para o aumento da resistência do betão.

Quanto maior for a relação água/cimento maior será a quantidade final de poros capilares, pois para razões A/C superiores a 0,38 todo o cimento hidrata e o volume dos componentes resultantes não ocupa todo o espaço livre, Figura 1 (Coutinho M. , 2005).

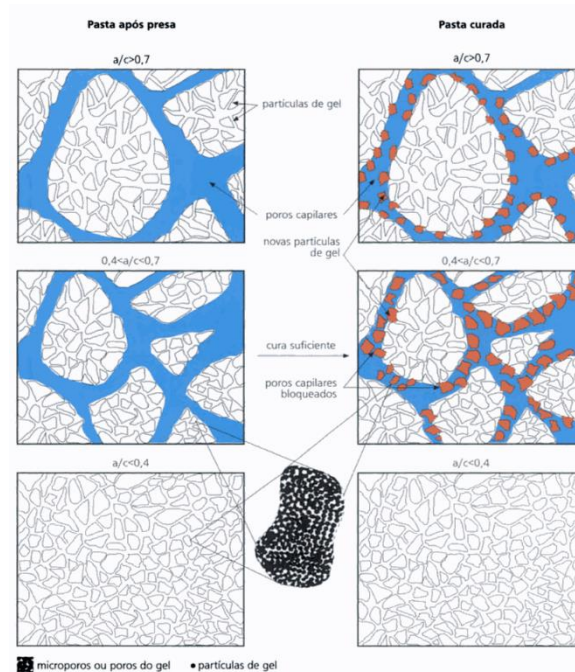


Figura 1 - Representação da influência da razão a/c e cura na rede porosa capilar. (Coutinho M. , 2005)

Podemos afirmar que a porosidade total de um betão é constituída por duas parcelas: pela porosidade aberta e pela porosidade fechada. A porosidade aberta é a rede de poros que se encontra interconectada e apresenta uma ligação com o exterior do betão. A particularidade dessa rede interconectada e aberta permite que haja trocas entre o betão e o meio envolvente. Já a porosidade fechada diz respeito aos poros isolados (não apresentam ligação ao exterior) existentes no interior do betão. A porosidade fechada não afeta tanto a durabilidade do betão como a porosidade aberta, essa tem maior influência nas resistências mecânicas do betão (Sumanasooriya & Neithalath, 2011), (PETER C. Hewlett, 1988).

Um betão poroso não é sinónimo de um betão permeável. A permeabilidade está relacionada com a capacidade de escoamento de um fluído na rede porosa do material. Já a porosidade define-se como o volume de vazios em relação ao volume total da amostra, Figura 2 (Coutinho M. , 2005).

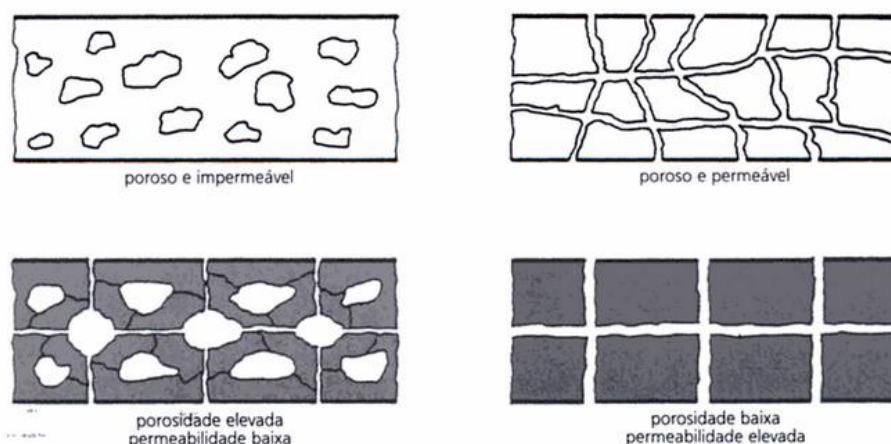


Figura 2 - Esquema representativo de permeabilidade e porosidade. (Coutinho M. , 2005)

A porosidade de um betão, para além de se caracterizar como fechada ou aberta, também se caracteriza de acordo com o tamanho dos poros. Existem poros com um diâmetro na ordem de 50 – 100 μm que são os poros formados pelos introdutores de ar, tendo como objetivo conferir ao betão uma proteção adicional à ação gelo-degelo. Como referido anteriormente, durante a mistura e colocação do betão também ocorre a formação de poros que apresentam dimensões milimétricas. Os espaços existentes entre os grãos de cimento não hidratados apresentam dimensões nanométricas e são responsáveis pelo mecanismo de capilaridade, poros capilares. Existem ainda, à escala nanométrica, os poros do gel formados inicialmente durante a hidratação dos compostos do cimento (Wu & Johannesson, 2014).

É possível verificar na Figura 3 um modelo simplificado da estrutura da pasta de cimento onde se encontram presentes os vários tipos de poros.

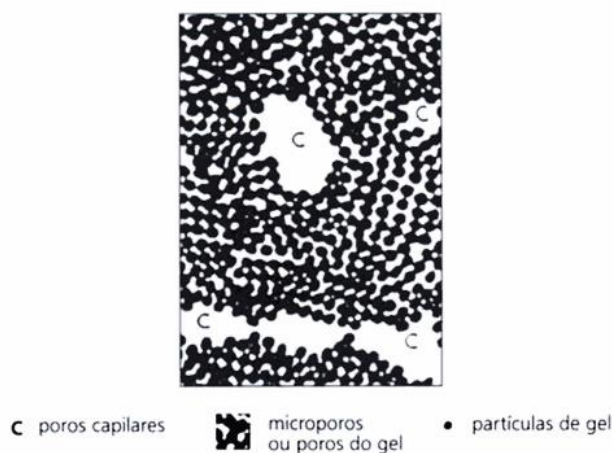


Figura 3 - Modelo da estrutura da pasta de cimento. (Coutinho M. , 2005)

Após a compreensão da estrutura interna da matriz de um betão é fulcral entender os mecanismos físicos que regem a deslocação de líquidos e gases para o seu interior. Os três mecanismos de transporte que ocorrem na rede porosa do betão são:

- a) **Permeabilidade**, que se refere ao movimento de um fluído provocado por uma diferença de pressão e rege-se pela lei de escoamento laminar de Darcy (Neville, 2011).

$$V = K \frac{\Delta h}{L} \quad (1)$$

$$K = \frac{K' \rho g}{\eta} \quad (2)$$

Onde:

K' – coeficiente relacionado com a permeabilidade intrínseca do betão, grandeza independente do fluído (m^2)

ρ – massa específica do fluído (kg/m^3)

η – viscosidade dinâmica do fluído ($N.s/m^2$)

- b) **Sucção capilar ou absorção**, em que a água penetra a rede porosa do betão devido a forças capilares que resultam da diferença de pressão entre a superfície livre da água no exterior do betão e a sua superfície nos poros capilares, Figura 4 (Coutinho M. , 2005). A pressão capilar varia em função da temperatura, do teor de humidade e do raio dos poros (Freitas, Torres, & Guimarães, 2008). É necessário distinguir a absorção por capilaridade de **absorção por imersão**. Este último corresponde ao processo pelo qual os poros de um sólido são preenchidos por um líquido (Cóias, 2006).

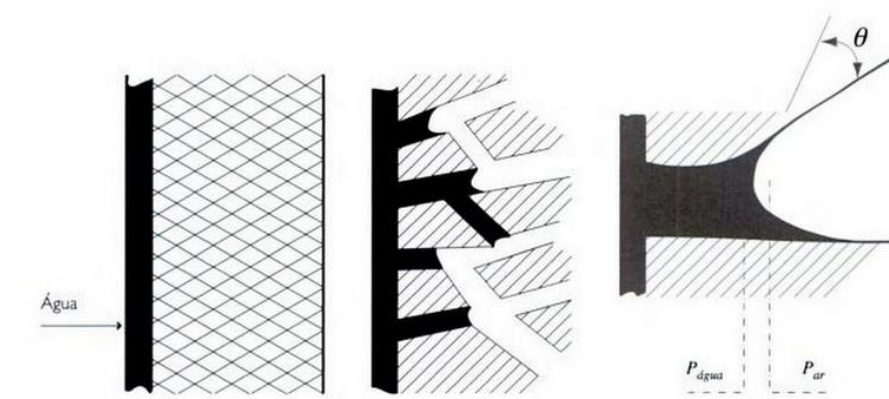


Figura 4 - Fenómeno de capilaridade. (Freitas, Torres, & Guimarães, 2008)

A absorção capilar é proporcional à raiz quadrada do tempo e pode ser determinada pela equação (3). Sabe-se ainda que quanto maior forem os capilares mais elevada será a absorção por capilaridade (Coutinho M. , 2005).

$$A = a_0 + S \cdot t^{0,5} \quad (3)$$

em que:

A – é a quantidade de água absorvida por unidade de área da secção em contacto com a água desde o início do ensaio (mg/m²).

a₀ – água absorvida inicialmente pelos poros na superfície de contacto (mg/m²).

S – coeficiente de absorção em mg/(mm² x min^{0,5}).

A autora Coutinho, JS, na publicação intitulada “*Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem*” apresenta uma figura onde é possível correlacionar a qualidade de um betão com o coeficiente de absorção, Figura 5.

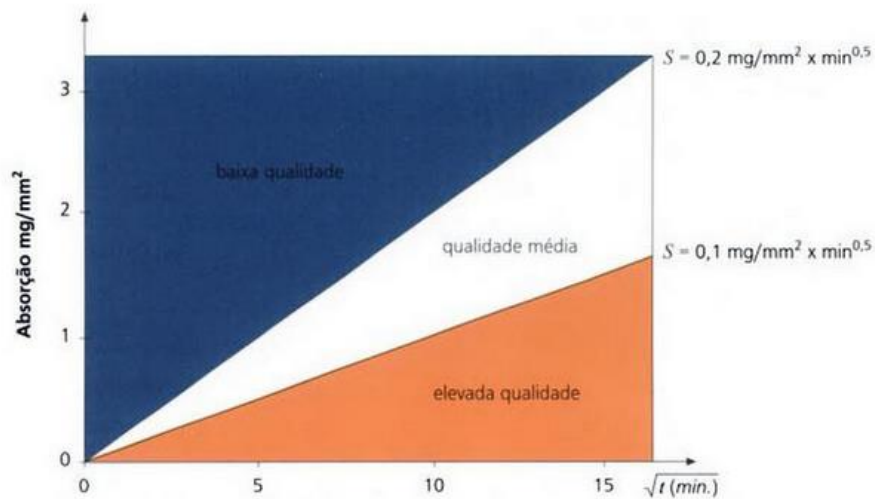


Figura 5 - Qualidade do betão em função do coeficiente de absorção S . (Coutinho M. , 2005)

- c) **Difusão**, corresponde ao mecanismo de transporte de um gás ou vapor resultante de uma diferença de gradiente de concentrações. Sempre que há diferenças de concentrações de quaisquer substâncias a tendência é que ocorra deslocamentos da matéria até que se estabeleça o equilíbrio. A lei de Fick's permite explicar e quantificar esses movimentos de reequilíbrios. O mecanismo de difusão será abordado em maior detalhe no próximo subcapítulo.

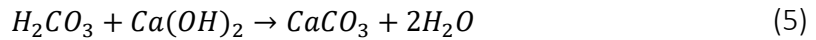
Fica assente que o mecanismo de permeabilidade ocorre principalmente na rede contínua e interligada de poros que existe na matriz do betão. No entanto, não se pode deixar de referir que a presença de agregados dificulta a permeabilidade, pois as partículas tornam o percurso mais longo e ondulante diminuindo a secção efetiva de escoamento.

Por último, salienta-se que todos os mecanismos responsáveis pela fissuração e microfissuração contribuem para o aumento da permeabilidade do betão e, conseqüentemente, para uma perda de resistência mecânica e de durabilidade.

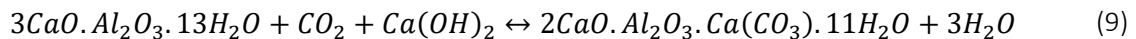
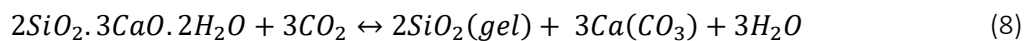
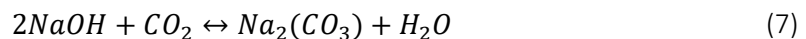
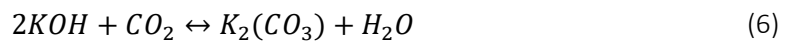
2.5. Carbonatação

A carbonatação do betão resulta da interação entre o dióxido de carbono atmosférico com os hidróxidos existentes no betão. O dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera penetra no interior do betão e reage com as moléculas de água (H_2O) existentes nos poros do betão. Por sua vez, o CO_2 dissolve-se e origina o ácido carbónico (H_2CO_3), (4). Esse ácido reagirá com

os hidróxidos de cálcio (Ca(OH)_2) e os aluminatos de cálcio hidratados, contribuindo para o abaixamento do pH do betão, (5) (Broomfield J. P., 1997).



As equações químicas apresentadas acima são as mais conhecidas, mas de facto o dióxido de carbono reage em primeiro lugar não com os hidróxidos de cálcio, mas sim com os hidróxidos de potássio e de sódio, equações (6) e (7). As reações químicas que se dão em seguida são entre o dióxido de carbono e os silicatos, e também entre o dióxido de carbono e os aluminatos do cimento hidratado, equações (8) e (9) (Coutinho M. , 2005).



O dióxido de carbono, ao reagir com os hidróxidos da pasta cimentícia hidratada, cria uma diferença de gradiente de concentrações de CO_2 entre o exterior e o interior do betão. Essa diferença de concentrações é responsável pela migração do dióxido de carbono para o interior do betão, mecanismo de difusão. A deslocação do CO_2 para o interior do betão dá-se através de uma película de água existente nas paredes dos poros. Por esse motivo não existe penetração de CO_2 em betões completamente secos nem em betões totalmente saturados. Nesta última situação porque não há ar com CO_2 no interior do betão (Cóias, 2006), (Coutinho M. , 2005).

A carbonatação do betão inicia-se à superfície do betão, progredindo para o seu interior de acordo com a primeira lei de Fick's, equação (10):

$$J = -D \frac{\delta C}{\delta x} \quad (10)$$

onde: J é o fluxo, C a concentração da substância (moles cm^{-3}), x é a distância (cm) e D é a constante de difusão que depende da qualidade do betão (cm^2s^{-1}).

A concentração média de CO₂ existente na atmosfera terrestre é cerca de 0,03% em volume, correspondendo a 0,5 mg por litro de ar. No entanto, nos centros urbanos e ambientes fabris a concentração de CO₂ é muito superior, podendo atingir 1% (Thiery, 2005).

É importante estimar qual será a concentração média de CO₂ a que o betão estará sujeito durante a sua vida útil. Com esse parâmetro definido, e com um estudo prévio da resistência do betão ao processo de carbonatação, é possível estimar qual será a profundidade máxima de carbonatação e com isso definir o recobrimento mínimo das armaduras.

A progressão da profundidade de carbonatação pode ser traduzida por uma expressão numérica do tipo da equação (11) (Coutinho M. , 2005):

$$x = K_c \sqrt{t} \quad (11)$$

em que:

x – é a profundidade de carbonatação (mm)

t – tempo (anos)

K_c – é a constante que depende do coeficiente de difusão, temperatura humidade e concentração de dióxido de carbono. (mm/ano^{1/2})

Porém existem outras equações empíricas formuladas que tentam determinar a profundidade da carbonatação do betão, dependendo de vários parâmetros: condições ambientais em que o betão está submetido, temperatura, humidade, concentração CO₂, razão A/C, teor de alcalis ou percentagem de cinzas volantes (Broomfield J. P., 1997).

No que concerne às dosagens de cimento pode afirmar-se que quanto maiores são as dosagens de cimento e menores as razões A/C de um betão, menor será a velocidade de propagação da carbonatação (Coutinho A. d., 1973), (Coutinho M. , 2005), (Soroka, 1993).

Os produtos resultantes da reação de carbonatação apresentam um volume superior aos compostos iniciais, hidróxidos de cálcio, ocorrendo assim um preenchimento da estrutura porosa do betão. O resultado da diminuição da porosidade do betão traduz-se num aumento da resistência mecânica, o que é benéfico (Thiery, 2005).

O verdadeiro problema do fenómeno da carbonatação do betão consiste na diminuição do seu pH. Caso o betão contenha armaduras de aço, e o pH do meio envolvente seja superior a 12,5, ocorre a formação de uma micro-película protetora à volta das armaduras (passivação das armaduras) que impede a dissolução do ferro (processo de corrosão das armaduras). No

entanto, com a diminuição do pH do betão essa película protetora desaparece dando-se início à corrosão das armaduras, Figura 6.

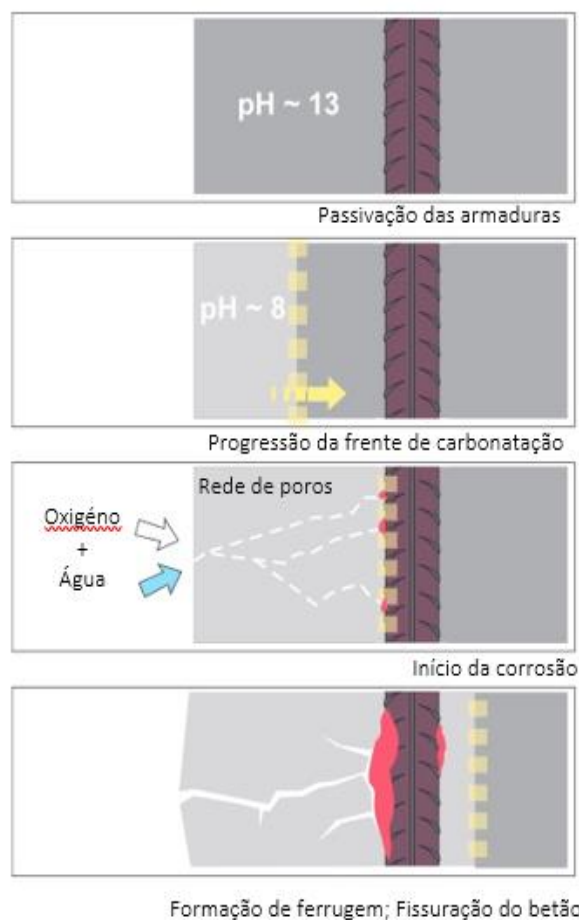


Figura 6 - Corrosão das armaduras devido à carbonatação do betão. (Grosogeat & Colon, 2008)

A profundidade da carbonatação de um betão pode ser rapidamente determinada medindo o pH do betão.

É possível identificar o pH de uma substância recorrendo a fenolftaleína. Ao vaporizar uma solução alcoólica de fenolftaleína no betão surgirá o aparecimento de uma tonalidade de acordo com o pH do betão, carmim, rosa ou, caso o betão se encontre carbonatado (pH inferior a 8), a solução pulverizada fica incolor, Figura 7.



Figura 7 - Ensaio de fenolftaleína (Wikipédia)

Os danos provocados pela carbonatação ocorrem mais rapidamente quando as armaduras não apresentam um recobrimento adequado, ou quando a estrutura porosa do betão é aberta, isto é, quando os poros estão interconectados entre si facilitando a difusão do CO_2 no betão.

2.6. Fluência

A fluência do betão caracteriza-se pelo aumento progressivo da deformação com o tempo, após a deformação instantânea, devido à aplicação de uma tensão constante e permanente. A deformação por fluência tende a estabilizar antes do 1º ano de idade do betão (Coutinho A. D., 1973).

A fluência deve-se essencialmente aos seguintes fatores: rigidez e resistência do betão, dimensões do elemento, temperatura e humidade do ambiente, idade do betão no primeiro carregamento, duração e intensidade da carga e, tipo de cura (EC2, 2010).

A fluência deve ser prevista com fiabilidade, pois um valor elevado implica o aumento das deformações dos elementos estruturais, perdas de pré-esforço, fendilhação de elementos com deformações impedidas, e aumento dos esforços em elementos comprimidos sujeitos a cargas excêntricas (Costa H., 2007), (Costa & Appleton, 2002).

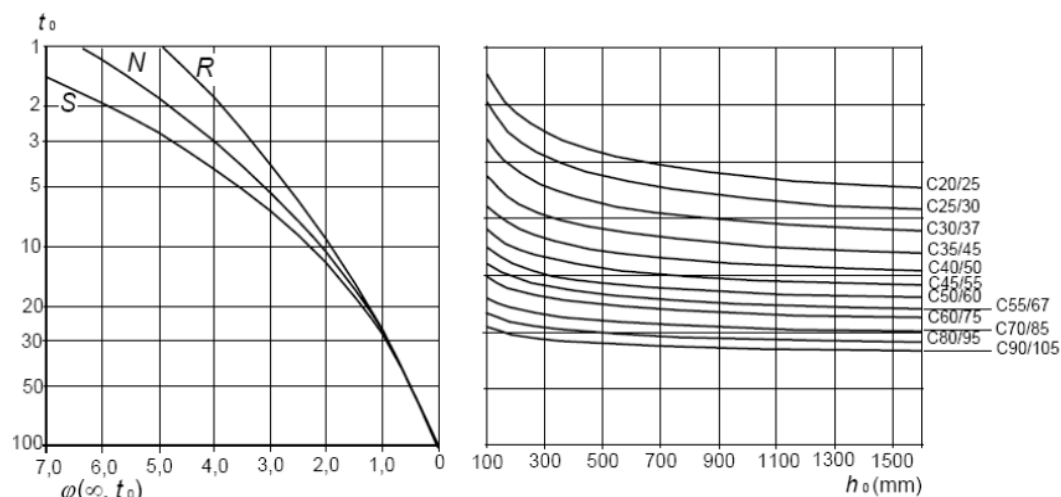
O método experimental para caracterizar a fluência consiste em carregar provetes de betão, à idade pretendida, com uma tensão constante que deve estar compreendida entre 30 a 40% do valor da tensão de rotura, e medir as deformações instantâneas e a evolução da deformação com o tempo. A deformação por fluência, ε_{fl} , é dada pela diferença entre a deformação total, e a soma das deformações instantâneas e de retração. O coeficiente de fluência, φ , é obtido pelo quociente entre as deformações elástica e as de fluência.

Segundo o EC2, os valores do coeficiente de fluência a longo prazo, $\varphi(\infty, t_0)$, podem ser obtidos simplificadamente através de ábacos, Figuras 8 e 9. O Anexo B desse código contém

expressões preconizadas que permitem fazer uma estimativa do coeficiente de fluência para uma determinada idade, $\varphi(t)$ (EC2, 2010).

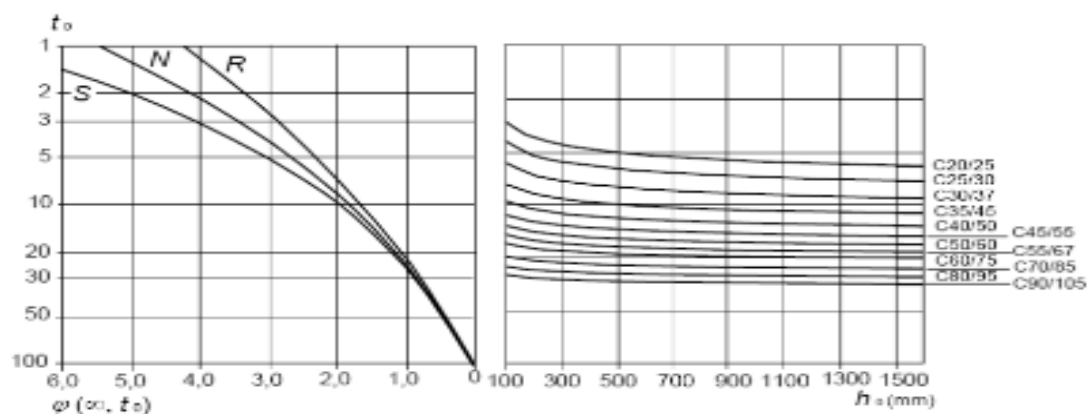
Quando o valor da tensão aplicada é superior a 45% do valor característico da tensão de rotura, o EC2 propõe que se multiplique ao valor do coeficiente de fluência o seguinte termo corretor:

$$\varphi_k(t) = \varphi(t) \cdot \exp\left(1,5 \left(\frac{\sigma_0}{f_{tck}} - 0,45\right)\right) \quad (12)$$

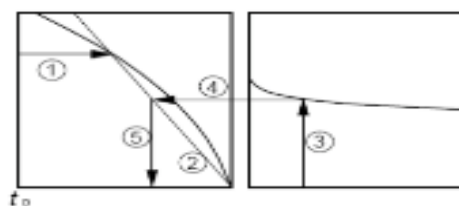


a) Ambiente interior $HR = 50 \%$

Figura 8 - Determinação do coeficiente de fluência de betão num ambiente interior pelo EC2. (EC2, 2010)



b) Ambiente exterior $HR = 80 \%$



Nota:
 - o ponto de intersecção das linhas 4 e 5 pode situar-se igualmente acima do ponto 1
 - para $t_0 > 100$ é suficientemente preciso assumir $t_0 = 100$ (e utilizar a tangente)

Figura 9 - Determinação do coeficiente de fluência de betão num ambiente exterior pelo EC2. (EC2, 2010)

Os resultados do ensaio de fluência poderão ser distorcidos pela maneira como o desenvolvimento das resistências do betão se dá. Sabe-se que a fluência de um betão depende do grau de hidratação do cimento; quanto maior for o grau de hidratação do cimento no betão, maior a rigidez e menor será a fluência. Ao utilizarem-se cinzas volantes na composição dos betões, por substituição do cimento, as resistências iniciais são inferiores comparativamente aos betões que não contêm cinzas volantes. Caso o carregamento do betão se dê em idades jovens, quando o betão ainda apresenta resistências baixas, as deformações permanentes nos elementos serão maiores. No entanto a rigidez e as resistências a longo prazo serão maiores. (FIB CEB-FIP , 2010).

2.7. Retração

A retração pode ser traduzida por uma diminuição dimensional da peça de betão sem que haja variações de temperatura e de tensões aplicadas. Embora menos frequente, este fenómeno pode ser de expansão, ocorrendo, por exemplo, em ambientes húmidos. De um modo geral, pode dizer-se que a retração se deve à variação do volume da pasta de cimento, em consequência da evaporação da água de amassadura e das reações de hidratação das partículas de cimento. Porém, há outros factores que contribuem para a retração, como é exemplo a carbonatação do betão.

Os parâmetros de composição do betão devem atender à minimização da retração, pois quando o valor é elevado provoca efeitos indesejados no betão, que comprometem a sua durabilidade. Os principais problemas são: aumento das deformações dos elementos estruturais, principalmente lajes e vigas, perdas da força de pré-esforço em elementos pré-tensionados e pós-tensionados nas estruturas pré-esforçadas, fendilhação de elementos com deformações impedidas, e aumento dos esforços em elementos comprimidos sujeitos a cargas excêntricas (Costa H., 2007), (Costa & Appleton, 2002).

Consoante as causas de variação de volume do betão, podem considerar-se diferentes tipos de retração, sendo a retração plástica, a retração autogénea e a retração de secagem as mais importantes.

A retração plástica resulta da evaporação de água à superfície do betão antes de ocorrer a presa. Este tipo de retração pode provocar fendilhação superficial no betão, podendo afetar a durabilidade das estruturas.

Após a presa do betão ocorrem a retração autogénea e a retração de secagem. A primeira deve-se à hidratação do cimento que consome a água no interior da massa de betão, nos primeiros dias após a betonagem, e acontece na ausência de trocas de humidade com o exterior. A segunda dá-se no betão já endurecido e é originada pela evaporação de água que não foi consumida pelas reações de hidratação do cimento, originando tensões de tração no betão devido a restrições ao livre encurtamento das peças, podendo provocar a fendilhação das estruturas (Costa & Appleton, 2002).

Em suma, os principais fatores que influenciam a retração são: as dosagens de água e de cimento; a humidade relativa do ar, que influencia a velocidade de evaporação da água e, portanto, o valor e duração da retração; a geometria e dimensão das peças, porque quanto menor for a superfície exposta, menor é a evaporação de água, e assim menor será a retração (Costa & Appleton, 2002).

3. Materiais

3.1. Introdução

O betão é um material compósito constituído por uma mistura de agregados envolvidos por uma matriz ligante. A matriz que interliga os agregados é vulgarmente conhecida como pasta ligante, que pode ser de base orgânica, como é o caso dos polímeros e betumes, ou inorgânica como são as pastas à base de cal hidráulica ou de cimento Portland (D. Callister & G. Rethwisch, 2013).

Os ligantes inorgânicos são geralmente constituídos por vários minerais, este grupo de ligantes subdividem-se em: ligantes hidráulicos, quando conseguem adquirir presa e endurecer em meio aquático; ligantes não hidráulicos, quando não são capazes de adquirir presa submersos. Um ponto em comum nos ligantes inorgânicos é que todos necessitam de água na sua mistura para se dar início às reações químicas e ganharem presa (Li, 2011).

3.2. Cimento Portland

O desenvolvimento do cimento Portland, tal como o conhecemos hoje, foi conseguido num curto espaço de tempo. A patente do primeiro cimento hidráulico foi registada em 1796 por James Parker na Inglaterra. Passados apenas 17 anos, em 1813 na França, Vicat patenteou o processo de fabrico da cal hidráulica, e em 1824 o Britânico Joseph Aspdin desenvolveu o cimento Portland. O cimento Portland ganhou o seu nome porque em Portland, Inglaterra, existia uma pedra calcária com características e cor semelhantes ao material desenvolvido por Joseph (Li, 2011).

O processo de produção do cimento Portland começa com a extração dos compostos minerais da pedra que, posteriormente, são moídos e misturados nas proporções previamente determinadas. A mistura homogeneizada é encaminhada para um forno rotativo e é cozida a uma temperatura de 1400°C, onde ocorre o processo de clinquerização. O produto resultante, o clínquer, é posteriormente moído e é-lhe adicionado gesso assim como outras adições, obtendo-se como produto final o cimento Portland (Costa, 2012).

O clínquer é constituído maioritariamente por alite (silicato tricálcico (C_3S)), belite (silicato bicálcico (C_2S)), aluminato tricálcico C_3A e por ferrite $C_2(A,F)$. A alite e o aluminato tricálcico são responsáveis pelo desenvolvimento rápido das resistências. Já o desenvolvimento das reações de hidratação da belite ocorrem posteriormente e contribuem para as resistências finais a longo prazo, (Kolhaas, 1983), Tabela 2.

Tabela 2 - Constituintes do clínquer, (Kohlhaas, 1983)

Componentes do clínquer	C_3S	C_2S	C_3A	$C_2(A,F)$
Proporções médias	60%	15%	11%	8%
Propriedades técnicas	Hidratação rápida, resistências iniciais altas e boas resistências finais. Calor de hidratação moderado	Hidratação lenta, resistências finais boas, baixo calor de hidratação	Hidratação rápida, calor de hidratação alto, retrações elevadas, desenvolvimento de resistências iniciais altas, reage com sulfatos	Hidratação lenta, contribui pouco para a resistência, calor de hidratação moderado, responsável por dar a cor ao cimento

Ao misturar-se água ao cimento iniciam-se as reações de hidratação, sendo estas reações exotérmicas. Com as reações de hidratação a pasta começa a ganhar presa e resistência, mesmo debaixo de água.

A superfície específica do cimento é também um fator que desempenha um papel relevante. Quanto maior for a superfície específica mais rápido evoluirá a resistência. Isso deve-se ao facto de haver uma maior área de contacto entre as moléculas de água e os constituintes do cimento. Uma rápida hidratação do cimento resulta numa diminuição da trabalhabilidade do betão e num aumento da sua temperatura. Com temperaturas superiores ocorre uma rápida evaporação da água do betão contribuindo para a sua fissuração e porosidade. A utilização de betões com hidratações rápidas carece, assim, de maiores cuidados no processo de cura, caso

contrário poderá ocorrer uma diminuição da resistência final e da sua durabilidade (Costa H. S., 2007) (Newman & Choo, 2003).

A classificação do cimento Portland é efetuada de acordo com a percentagem de clínquer e adições que o constituem. Na norma NP EN 197-1 o cimento corrente Portland é subdividido em 5 grupos: CEM I cimento Portland, CEM II cimento Portland composto, CEM III cimento de alto forno, CEM IV cimento pozzolânico e o CEM V cimento composto. Existem no total 27 tipos de cimentos correntes; no entanto, é possível criar outros cimentos alterando as percentagens de adições utilizadas (NP EN 197-1 , 2001).

O cimento pode ser ainda classificado de acordo com a sua resistência mecânica aos 28 dias, sendo precedente de uma designação “R “(rápido) quando as resistências iniciais são elevadas, ou “N” (normal) no caso da evolução da resistência ser normal, Tabela 3.

Tabela 3 - Requisitos mecânicos do cimento. (Alves, 2015), (NP EN 197-1 , 2001)

Classes de resistência	Resistência à compressão (Mpa)				Tempo de início de presa (min)	Expansibilidade (mm)
	Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência			
	2 dias	7 dias	28 dias			
32,5 N	-	≥16,0	≥32,5	≤52,5	≥75	≤10
32,5 R	≥10,0	-				
42,5 N	≥10,0	-	≥42,5	≤62,5	≥60	
42,5 R	≥20,0	-				
52,5 N	≥20,0	-	≥52,5	-	≥45	
52,5 R	≥30,0	-				

3.3. Agregados

Não é com espanto que se pode afirmar que existe uma elevada correlação entre a qualidade dos agregados e a durabilidade e resistência de um betão, cerca de 75% do volume de um betão é constituído por agregados.

Os agregados utilizados na indústria dos betões podem ser de origem natural (rolados) ou artificiais (britados). São classificados de acordo com a sua densidade, agregados leves todos o que apresentam uma massa volúmica inferior a 2000 kg/m³, agregados normais caso a sua

massa volúmica esteja compreendida entre 2000 – 3000 kg/m³ e agregados pesados todos os que esse valor excede 3000 kg/m³.

No que concerne às dimensões podemos agrupar os agregados finos (areias), quando as dimensões das partículas são inferiores a 5 mm, e em agregados grossos todos os restantes agregados.

As propriedades dos agregados com maior influência no comportamento do betão fresco ou endurecido são:

- Granulometria;
- Forma das partículas;
- Porosidade;
- Rigidez;
- Resistência mecânica.

A resistência mecânica dos agregados, regra geral, é sempre superior à resistência da pasta ligante; assim, a rotura do betão corrente é condicionada não pela capacidade de resistência do agregado, mas pela capacidade de resistência da pasta ligante.

Já a forma das partículas carece de maior atenção. Partículas laminares tendem a formar estratos orientados que apresentam uma maior resistência numa das suas direções. A forma das partículas influencia ainda a trabalhabilidade do betão no estado fresco. Agregados lisos conferem uma maior trabalhabilidade enquanto que os agregados rugosos a diminuem. No entanto, os agregados rugosos aumentam a resistência à tração do betão pois ocorre uma maior aderência entre a pasta ligante e o agregado. (Costa & Appleton, 2002)(Coutinho, 1999)

O estudo da granulometria dos agregados é uma das bases da formulação dos betões. Só através do conhecimento da granulometria dos vários agregados é que se consegue estabelecer as percentagens a utilizar de cada agregado, de forma a garantir um “encaixe” máximo entre partículas. Esse “encaixe” otimizado entre partículas corresponde à compacidade máxima (Coutinho, 1999).

A dimensão máxima do agregado a utilizar num betão é definida em projeto e vai depender do espaçamento definido entre armaduras, recobrimento mínimo e dimensão da peça a betonar. Quanto maior a dimensão de um agregado menor vai ser a quantidade de água e pasta

ligante necessárias. A máxima dimensão do agregado grosso influencia a resistência do betão, comparando betões com manutenção dos restantes parâmetros de formulação, havendo uma tendência de redução da resistência com o aumento da dimensão máxima do agregado, principalmente nas misturas com menor relação A/C, Figura 10.

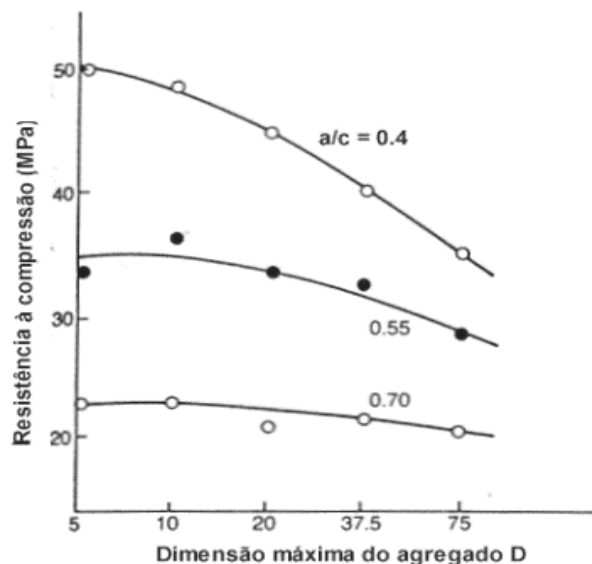


Figura 10 - Efeito da dimensão máxima do agregado grosso e da razão a/c na resistência do betão,(Coutinho, 1999)

Os agregados devem ser isentos de substâncias nocivas, tais como, matéria orgânica, argilas ou outros químicos que possam comprometer o desempenho dos betões. Esses devem obedecer à especificação (E 373) do LNEC. Nesse documento são referidos os ensaios necessários a realizar para determinar as respetivas características.

**Tabela 4 - Características e verificação da conformidade dos agregados de com a E 373 do LNEC
(E 373) , (Coutinho M. , 2005)**

Características		Norma	Valor a satisfazer
Resistência mecânica dos inertes grossos medida através de	– Resistência à compressão	NP 1040	≥ 50 Mpa
	– Resistência ao esmagamento	NP 1039	≤ 45 %
	– Desgaste Los Angeles	E 237	≤ 50 %
	– Degradação pelo sulfato de sódio ou de magnésio	NP 1378	SO ₄ Na: perdas peso < 10% SO ₄ Mg: perdas peso < 15% ao fim de 5 ciclos de ensaio
Absorção de água e massa volúmica	– Inertes grossos – De areias	NP 581 NP 984	Absorção ≤ 5 % Absorção ≤ 5 %
Quantidades de partículas ou matérias prejudiciais	– De matéria orgânica	NP 85	Não prejudicial
	– De partículas muito finas e matéria solúvel	NP 86	Areia natural ≤ 3 % Areia britada ≤ 10 % Godo ≤ 2 % Brita ≤ 3 %
	– De partículas de argila	E 196	≤ 2 % da massa do ligante
	– De partículas friáveis	NP 1380	Areias ≤ 1 % Godo ou brita $\leq 2,5$ %
	– De partículas moles	E 222	Godo ou brita ≤ 5 %
	– De partículas leves	NP 953	Areias $\leq 0,5$ % Godo ou brita ≤ 1 %
Índice volumétrico		E 223	Godo $\geq 0,12$ % Brita $\geq 0,15$ %
Reatividade potencial com os álcalis do cimento.	– Processo absorciométrico	E 159	Negativo
	– Processo da barra de argamassa	NP 1381	Extensão < $1,0 \times 10^{-3}$ ao fim de 6 meses
	– Análise petrográfica	E 415	Negativo
Reatividade com o sulfato		E 251	Provete de argamassa: – Ausência de rendilhamento – Extensão < $0,5 \times 10^{-3}$ – Provete da rocha: – Extensão < $0,5 \times 10^{-3}$ ao fim de 6 meses
Teor de cloretos		E 253	-
Teor de sulfuretos		NP 2107	-
Teor de sulfatos		NP 2106	-
Teor de álcalis		NP 1382	-
Análise granulométrica		NP 1379	-
Baridade		NP 955	-
Teor de água total		NP 956 NP 957	-

3.4. Adições

As adições e os adjuvantes utilizados no betão são tão antigas como o próprio aparecimento do betão de base cimentícia. Os romanos adicionavam aos betões leite, gordura animal ou sangue com o intuito de melhorar as características dos betões. Na atualidade é indispensável

o uso de adições e adjuvantes nos betões como forma de melhorar as suas propriedades no estado fresco e endurecido (Li, 2011).

As adições classificam-se como adições do tipo I quando são quase inertes, sem propriedades hidráulicas latentes ou pozolânicas como é o caso dos fíleres minerais e pigmentos, e adições do tipo II quando são adições pozolânicas ou hidráulicas latentes como as cinzas volantes, as sílicas de fumo e as escórias de alto-forno (NP EN 206-1 2007).

3.4.1. Fíler calcário

O uso de fíler calcário, adição do tipo I, é uma solução utilizada quando há necessidade de melhorar a trabalhabilidade, aumentar o volume de finos e a compacidade da mistura. Este aumento de compacidade e consequente diminuição de volume de vazios diminui a permeabilidade do betão, contribuindo para o melhoramento da durabilidade do betão (Li, 2011).

Sabe-se também que um betão com uma estrutura interna mais compacta apresenta valores de resistência superiores. Estudos realizados por Gokce & Ozkan permitem inferir que a utilização de fíler calcário reduz o coeficiente de migração de cloretos do betão (Gokce, Beyaz, & Ozkan, 2016).

Uma vez que a retração de um betão ocorre derivado às reações de hidratação e à saída de água da pasta ligante, o uso de fíler calcário permite a redução da retração (Li & Kwan, 2015).

A utilização de fíler calcário como substituto de cimento contribui para a diminuição da pegada ecológica da indústria do betão. As próprias cimenteiras apresentam à venda cimentos que incluem na sua composição grandes percentagens de fíler calcário, como é o caso do cimento composto CEM II.

3.4.2. Sílica de fumo

No fabrico de metais sílicos, a temperaturas superiores a 2000 °C, produzem-se vapores de SiO_2 que oxidam e condensam em micropartículas esféricas. A sílica de fumo é um material com uma elevada pozolanidade que, quando adicionada à matriz ligante, confere um aumento de resistência ao betão, Figura 11 e Figura 12.

A elevada superfície específica na ordem de $20\text{m}^2/\text{g}$ e um peso específico de 586 kg/m^3 da sílica de fumo provoca um aumento da quantidade de água da amassadura, o que poderá ser

prejudicial, limitando a proporção normalmente usada. É possível substituir cerca de 5% a 15% de cimento Portland por sílica de fumo (Li, 2011).

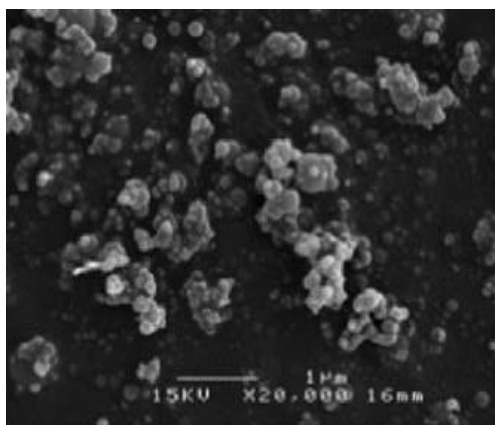


Figura 11 - Imagem microscópica de sílica de fumo (Li, 2011).



Figura 12 - Amostra de sílica de fumo (Costa H. S., 2007)

3.4.3. Escórias de alto forno

Outro subproduto da indústria metalúrgica que pode ser utilizado como adição são as escórias de alto forno. A sua formação resulta do arrefecimento rápido da escória fundida e a sua constituição química é maioritariamente silicatos e aluminossilicatos de cálcio.

A nível físico apresentam uma granulometria inferior a 45 micros e uma superfície específica de Blaine compreendida entre 400 a 600 m²/kg, Figura 13 e Figura 14 (Page, 1996).

A escória de alto forno é usada como substituto de clínquer em determinada percentagem pois essa apresenta uma elevada pozolanidade. Esta contribui ainda para uma rápida evolução da capacidade de resistência dos betões aos 7 dias (Li, 2011).

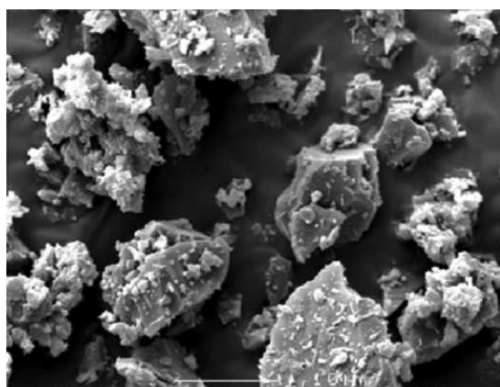


Figura 13 - Imagem microscópica de escoras de alto forno. (Li, 2011)



Figura 14 - Amostra de escórias de alto forno. (Costa H. S., 2007)

3.4.4. Cinzas volantes

As cinzas volantes são constituídas maioritariamente por sílica, aluminatos e óxidos de ferro. As cinzas volantes, Figuras 15 e 16, podem ser de origem vulcânica (rochas com elevado teor de sílica amorfa), de origem industrial (subproduto da queima de carvão) ou artificial quando se submete agregados previamente selecionados a um tratamento térmico.

Ao adicionar-se cinzas volantes à composição de um betão a sílica e os aluminatos que as constituem reagem com os hidróxidos de cálcio, que é um subproduto da hidratação do cimento Portland, e endurecem (Luís, 2013).

O resultado da formação desses novos cristais é uma redução da permeabilidade e aumento da resistência a longo prazo nos betões (Newman & Choo, 2003).

Quando o betão se encontra no estado fresco é possível verificar uma melhoria da sua trabalhabilidade quando se incorpora cinzas volantes. Esse melhoramento deve-se à forma esférica que as partículas apresentam, Figura 15.



Figura 15 - Imagem microscópica de cinzas volantes (Li, 2011).



Figura 16 - Amostra de cinzas volantes. (Costa H. S., 2007)

Outra característica importante que o uso das cinzas volantes promove é a diminuição do pico de calor de hidratação do betão (atingem-se temperaturas inferiores), o que é uma solução interessante quando o betão se destina a estruturas de grandes massas como, por exemplo, no caso das barragens.

A principal desvantagem do uso de cinzas volantes são as baixas resistências do betão nas primeiras idades, no entanto esse problema pode ser ultrapassado com a utilização de um ativador alcalino. (Li, 2011)

3.5. Adjuvantes

Os adjuvantes são produtos, geralmente em solução líquida, que podem ser adicionados em pequenas quantidades ao betão, com o intuito de melhorar as suas propriedades nos estados fresco e endurecido. A percentagem de adjuvante a utilizar é determinada em relação à quantidade de cimento.

Na norma NP EN 206-1 2007 são definidos os vários adjuvantes, enquanto os seus requisitos são estabelecidos pela norma EN 934-2.

O aumento da complexidade dos desafios que os betões foram sendo sujeitos proporcionou o desenvolvimento de vários adjuvantes. Dos muitos adjuvantes existentes no mercado os mais utilizados na produção do betão são:

- Aceleradores ou retardadores de presa;
- Estabilizadores de presa;
- Hidrófugos;
- Inibidores de corrosão;
- Superplastificantes/Plastificantes.

Cerca de 76% dos adjuvantes utilizados na Europa são superplastificantes ou plastificantes. Com a incorporação de um superplastificante na formulação de um betão é possível reduzir 12% a 40% de água de amassadura, dependendo da dose utilizada. Esta redução permite obter razões A/C bastante baixas, o que é favorável ao desenvolvimento de betões menos porosos e mais resistentes. (Costa H. , 2012)

Os dois principais mecanismos de atuação do superplastificante é o de adsorção superficial e o efeito espacial. Ao ser adicionada água à mistura as partículas de cimento não ficam uniformemente dispersas, tendem a agrupar-se em flocos. Esses flocos apresentam uma maior resistência a movimentarem-se quando comparados com os grãos de cimento individuais. Os superplastificantes funcionam porque as cargas negativas existentes na sua constituição ligam-se aos catiões de cálcio que existem na superfície dos grãos de cimento. Estando os grãos de cimento energeticamente carregados com a mesma carga estes tendem a dispersarem-se ficando as partículas de cimento rodeadas de água, o que facilita a sua hidratação e movimentação. Como consequência da redução da água da mistura e da dispersão das

partículas, a mistura sofre um aumento de fluidificação em fresco, sem alterar o volume da mistura, e as resistências dos betões aos primeiros dias aumentam consideravelmente (Newman & Choo, 2003).

3.6. Água

A água adicionada à amassadura origina o desenvolvimento das reações químicas responsáveis pelo ganho de presa e endurecimento do betão.

É de extrema importância garantir que a água utilizada na amassadura é apropriada. Numa primeira análise deve-se verificar a inexistência de óleos, espumas ou de odores típicos de águas com elevados teores de humos. Numa análise mais avançada deverá ser verificado o teor de sais dissolvidos, substâncias prejudiciais à qualidade do betão, assim como o pH (Schlumpf, Bicher, & Schwoon, 2003).

De acordo com a norma (NP-EN1008, 2003) a água é distinguida pela sua origem: água potável, água recuperada nos processos da indústria de betão, água subterrânea ou superficial, residual industrial, água do mar ou água doméstica.

Toda a água potável é considerada apta para o fabrico de betão, sendo dispensável a realização de análises químicas. No entanto, outros tipos de água que não potável devem ser feitos ensaios laboratoriais de controlo de qualidade, como forma de garantir o cumprimento dos critérios estabelecidos pela norma (NP-EN1008, 2003) e a especificação do LNEC (E372, 1993).

Os problemas mais comuns que a água apresenta é a existência de elevado teor de cloretos ou um pH inadequado. Os cloretos e pH inadequado são responsáveis pela indução da corrosão das armaduras no betão armado.

4. Programa Experimental

4.1. Materiais utilizados

A seleção e caracterização dos materiais utilizados para a execução das várias amassaduras é apresentada de forma resumida nos próximos subcapítulos.

4.1.1. Agregados

Para a composição dos betões foram escolhidos 4 agregados com granulometrias distintas, Tabela 5.

Os agregados foram previamente caracterizados e a sua seleção foi feita de forma a obterem-se betões com elevadas compacidades. As areias e o areão utilizados nas misturas dos betões são de origem natural apresentando uma superfície lisa, agregados rolados. No que concerne à brita calcária essa apresenta uma forma angular e rugosa derivado à sua britagem mecânica.

Tabela 5 - Agregados utilizados.

Agregado 1 -	Areia fina 0/3 mm (AF 0/3)
Agregado 2 -	Areia média 0/4 mm (AM 0/4)
Agregado 3 -	Areão 4/8 mm (Areão)
Agregado 4 -	Brita calcária 6/14 mm (Brita 1)

A caracterização dos agregados é apresentada abaixo; na Tabela 6 é sumariado as massas volúmicas e na Figura 17 as curvas granulométricas dos 4 agregados.

Tabela 6 - Massa volúmica dos agregados

Agregado	AF 0/3	AM 0/4	Areão	Brita 1
Massa volúmica (Kg/dm ³)	2,63	2,63	2,63	2,66

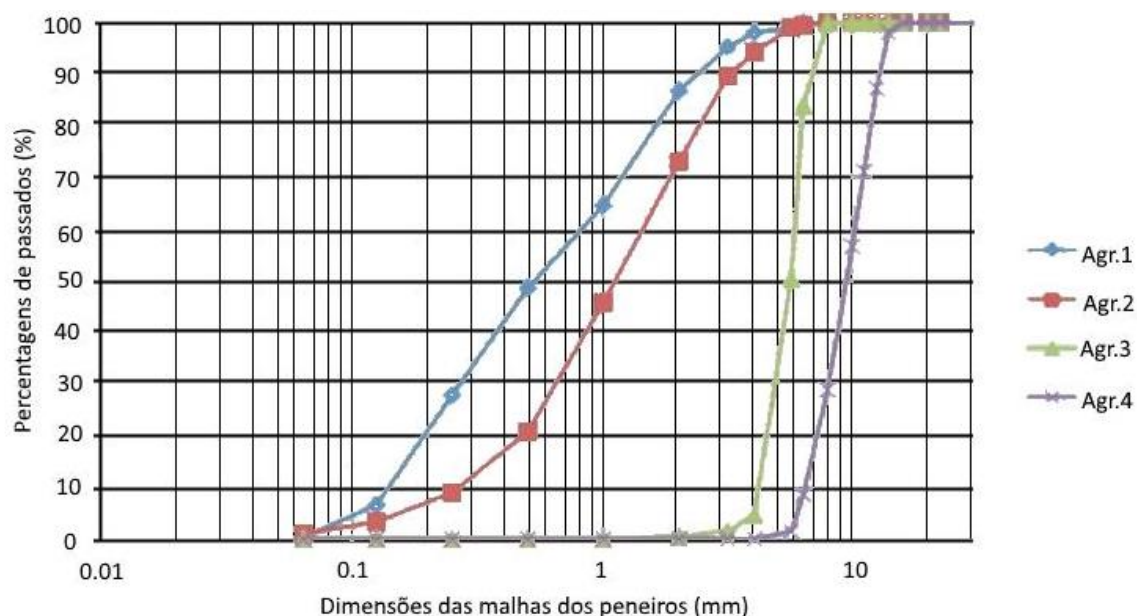


Figura 17 - Análise granulométrica dos agregados

4.1.2. Ligantes

Na execução do presente estudo laboratorial utilizou-se como ligante o cimento Portland CEM I 52.5R da SECIL. Este cimento apresenta uma elevada resistência e percentagem de clínquer ($\geq 95\%$) e uma massa volúmica de $3,12 \text{ Kg/dm}^3$. A elevada percentagem de clínquer permite adicionar grandes quantidades de adições garantindo boas resistências finais. A possibilidade de adicionar grandes quantidades de adições e poder variar as suas percentagens possibilita avaliar a influência e as consequências dessas adições nos betões produzidos.

4.1.3. Adições

As adições utilizadas nas amassaduras foram o fíler calcário e as cinzas volantes. Tal como referido na revisão bibliográfica, o fíler calcário tem como finalidade aumentar a trabalhabilidade e a compacidade das misturas. Já as cinzas volantes para além de contribuírem igualmente para um aumento da compacidade e da trabalhabilidade dos betões no estado fresco, proporcionam um incremento das resistências a longo prazo. Na Tabela 7 são apresentadas as massas volúmicas das adições utilizadas.

Tabela 7 - Massas volúmicas das adições

Adição	Fíler Calcário	Cinzas Volantes
Massa volúmica (Kg/dm ³)	2,70	2,30

4.1.4. Adjuvantes

Para produzir os betões foi utilizado unicamente um superplastificante, esse tem como objetivo reduzir a quantidade de água utilizada na amassadura sem que a trabalhabilidade seja afetada. O funcionamento deste superplastificante já foi referido na secção 3.4. O adjuvante selecionado foi o superplastificante, da BASF, Master Glenium SKY 526.

Na Figura 18 apresenta-se a ficha técnica com as características do superplastificante em questão.

Características técnicas	
Função principal:	Superplastificante / Forte redutor de água
Função secundária:	Acelerador de endurecimento
Marcação CE:	Segundo EN 934-2 como T3.1, T3.2 e T7
Aspecto:	Líquido turvo castanho
Densidade relativa (20°C):	1,07 ± 0,02 g/cm ³
pH, 20°C:	6 ± 1
Viscosidade (20°C):	< 140 cps
Teor de cloretos:	≤ 0,1 %
Os dados técnicos aqui apresentados são fruto de resultados estatísticos. Caso se pretendam valores de controlo, podem ser solicitados ao nosso Departamento Técnico.	

Figura 18 - Ficha técnica Master Glenium Sky 526 da BASF

4.1.5. Água de amassadura

As amassaduras dos betões foram todas executadas no Laboratório de Materiais de Construção – Jorge Lourenço, do DEC-ISEC. A água utilizada foi oriunda da rede pública e sendo essa potável a especificação do LNEC (E372, 1993) e a norma (NP-EN1008, 2003) isenta a realização de qualquer análise, definindo-a apta para a produção do betão.

4.2. Realização e cura dos provetes

Os agregados utilizados nas amassaduras efetuadas foram previamente secos em estufa e guardados em recipientes fechados. No que diz respeito aos ligantes e adjuvantes usados, esses foram mantidos nas suas embalagens de origem ou de armazenamento no laboratório.

A elaboração das pesagens dos constituintes foi feita com recurso a uma balança digital de precisão (um grama). As amassaduras foram realizadas em misturadora de eixo vertical no Laboratório. Para a caracterização do betão no estado fresco, nomeadamente a consistência, efetuou-se o ensaio do cone de Abrams e quando este ensaio não foi válido por falta de coesão do betão, efetuou-se o ensaio do grau de compactabilidade.

Foram utilizados moldes metálicos de diferentes dimensões e formatos sempre em conformidade com as normas europeias para os diversos ensaios. O enchimento dos moldes foi realizado por fases tendo-se compactado o betão numa mesa vibratória, Figura 22.

Os provetes foram desmoldados passadas 24 horas da sua betonagem. A cura dos provetes destinados aos ensaios de carbonatação, imersão e capilaridade foi feita num tanque com água potável à temperatura de 20 °C, Figura 19. O tanque encontra-se equipado com uma resistência e um termóstato que garante que a temperatura da água se mantenha constante, Figura 20.



Figura 19 - Tanque de cura dos



Figura 20 - Resistência do tanque de cura dos provetes

Relativamente aos provetes para execução dos ensaios da retração e fluência, esses foram curados numa câmara termo-higrométrica, controlada por sensores calibrados e certificados, à temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa de $50\% \pm 5\%$, Figura 21.



Figura 21 - Câmara termo-higrométrica

É necessário ainda referir que os provetes destinados ao ensaio de carbonatação após a cura em água durante 28 dias foram retirados do tanque, cortados e os topos protegidos com uma tinta selante de forma a garantir que o desenvolvimento da carbonatação apenas se dê pela superfície lateral. Finalmente, os provetes foram colocados na câmara termo-higrométrica até à data do início do ensaio de carbonatação.

Os moldes dos provetes produzidos foram os seguintes:

- Carbonatação: Provede cilíndrico, secção de 100mm de diâmetro e altura de 100mm ;
- Capilaridade: Provede prismático, de $100 \times 100 \times 200\text{mm}^3$;
- Imersão: Provede cúbico com aresta de 100mm ;
- Retração: Provede prismático, de $100 \times 100 \times 500\text{mm}^3$
- Fluência: Provede prismático, de $100 \times 100 \times 400\text{mm}^3$
- Módulo de elasticidade: Provede prismático, de $100 \times 100 \times 400\text{mm}^3$
- Resistência à compressão: Provede cúbico com aresta de 100mm ;



Figura 22- Enchimento de provetes

4.3. Composições estudadas

As composições das misturas foram estabelecidas tendo como principais variações as curvas granulométricas, dosagens de cimento e a substituição por adições, a quantidade de pasta ligante, a compacidade e a relação água/ligante (A/L).

É importante referir que o estudo dessas composições não é regido pelas recomendações da norma (NP EN 206, 207). O surgimento dos betões com baixas dosagens de cimento é relativamente recente, não existindo ainda qualquer referência normativa que defina o âmbito e os respetivos parâmetros na formulação.

Foi estabelecido que a quantidade mínima de cimento a utilizar nas misturas seria 75 Kg/m^3 e incrementar-se-ia a partir desse valor 50 Kg/m^3 de cimento, sendo o valor máximo a usar de 250 Kg/m^3 . As misturas obtidas teriam, então, na sua composição 75, 125, 175 e 250 Kg/m^3 de cimento.

Relativamente à pasta ligante foram definidos dois tipos de mistura: misturas com uma baixa dosagem de ligante 250 Kg/m^3 e compacidade de 0,86, designadas com a sigla LC; misturas formuladas com 350 Kg/m^3 de ligante e compacidade de 0,81, designadas com sigla C.

As misturas com baixa dosagem de cimento (LC) que apresentam a sigla F foram formuladas pela curva de referência de Faury tendo as restantes sido formuladas pela curva de referência de Alfred (LC75, LC125 e LC175). As misturas C foram formuladas pela curva de Faury.

Um ponto importante a mencionar é que todas as misturas, com exceção da mistura LC250A, apresentam praticamente a mesma relação A/L, mas varia a relação A/C. A mistura LC250A foi definida com base na mistura LC250 com uma compactidade de 0,81, procurando ter esse betão com outra gama de compactidade, relação A/L e resistência.

Por último, a composição da mistura C250 foi estabelecida para que fosse próxima de um betão corrente. Será esse considerado o betão de referência na análise de resultados.

As composições das misturas definidas foram validadas após a determinação das suas massas volúmicas e compactidades, não tendo sido necessário realizar quaisquer alterações às composições.

Na Tabela 8 são apresentadas as dosagens das misturas realizadas, assim como as várias relações A/L e A/C.

Importa salientar que o estudo de composições e a caracterização das propriedades mecânicas destes betões foi enquadrada na tese de desenvolvida por (Alves, H. 2015).

Tabela 8 - Composições dos betões realizados: dosagens em kg/m³

Betão	LC75	LC75F	C75	LC 125	LC125F	C125	LC175	LC175F	LC 250A	C250
CEM I 52,5 R	75,0	75,0	75,0	125,0	125,0	125,0	175,0	175,0	250,0	250,0
Filler Calcário	75,0	75,0	75,0	125,0	125,0	125,0	75,0	75,0	-	100,0
Cinzas Volantes	100,0	100,0	200,0	-	-	100	-	-	-	-
Areia fina 0/3	43,3	586,5	285,9	43,9	670,8	371,4	44,3	747,1	41,1	491,9
Areia média 0/4	1067,8	308,1	584,9	1080,0	244,3	520,0	1083,8	210,4	1005,0	427,6
Areão	283,3	77,8	105,9	287,2	82,2	110,3	288,1	97,9	267,2	116,2
Brita 1	623,3	1050,3	797,3	630,6	1049,2	796,8	632,4	997,0	586,7	795,1
Adjuvante	2,3	2,3	0,6	2,5	2,5	0,8	2,6	2,6	0,8	1,0
Água	117,8	117,8	169,2	117,8	117,8	169,2	117,3	117,5	179,4	169,2
Total agr.	2017,8	2022,7	1774,1	2041,7	2046,5	1798,4	2048,6	2052,4	1900,0	1830,8
A/C	1,57	1,57	2,25	0,94	0,94	1,35	0,67	0,67	0,72	0,68
A/(C+C.V)	1,03	1,03	1,09	0,94	0,94	1,03	0,67	0,67	0,47	0,68
A/L	0,47	0,47	0,48	0,47	0,47	0,48	0,47	0,47	0,72	0,48

4.4. Ensaio no estado fresco

Após a produção de um betão é realizado o ensaio que permita avaliar a trabalhabilidade do betão produzido. Determinada a trabalhabilidade de um betão é possível inferir sobre a qualidade futura que o betão terá no seu estado endurecido e a possibilidade, ou não, de o bombear, bem como a intensidade de compactação.

A determinação da trabalhabilidade das amassaduras foi feita recorrendo sempre ao ensaio de abaixamento, Slump test, no entanto, quando o ensaio não foi válido por coesão reduzida, determinou-se o grau de compactabilidade.

4.4.1. Ensaio de abaixamento

O ensaio de abaixamento, ou como é vulgarmente conhecido ensaio de Slump, foi executado de acordo com a norma (NP-EN12350-2, 2002). Esse consiste em encher um molde troncocónico em 3 camadas, compactando cada camada com 25 pancadas. Após o enchimento do molde esse é retirado e é determinado o valor que vai desde a altura do molde até à superfície do betão, Figura 23.



Figura 23 - Ensaio de abaixamento

A classe de consistência do betão é posteriormente obtida recorrendo à Tabela 9.

Tabela 9 - Classe de consistência

Classe	Abaixamento (mm)
S1	10 a 40
S2	50 a 90
S3	100 a 150
S4	160 a 210
S5	≥ 220

O ensaio de abaixamento só é válido se, após retirar-se o molde, o betão permanecer substancialmente intacto e simétrico. Na Figura 24 pode observar-se a completa desagregação do betão quando se retirou o molde, por falta de coesão. Os betões com baixas dosagens de cimento apresentam uma baixa coesão; assim, quando o ensaio de abaixamento não foi válido avaliou-se a trabalhabilidade pelo grau de compactabilidade. A determinação do grau de compactabilidade encontra-se descrito na próxima secção.



Figura 24 -Desagregação do betão por falta de coesão

4.4.2. Grau de compactabilidade

A determinação do grau de compactabilidade é um ensaio bastante simples de se realizar. Consiste em encher um molde com betão até à sua superfície e posteriormente vibrar na mesa vibratória, Figura 25. Depois de compactado mede-se o valor médio da distância entre a

superfície do betão compactado e a aresta da base superior do recipiente. (NP-EN12350-4, 2002)



Figura 25 - Betão compactado na mesa vibratória

4.5. Ensaio no estado endurecido

Os ensaios realizados nessa fase permitem caracterizar as propriedades dos betões e prever a sua resistência aos fatores de agressividade física, química e biológica.

Pelo facto de que a durabilidade de um betão está diretamente ligada à permeabilidade e à porosidade da sua estrutura interna, foram realizados ensaios de absorção de água por capilaridade e imersão.

Outro parâmetro que influencia a vida útil das estruturas de betão é a sua deformabilidade e fendilhação. Por esses motivos foram executados ensaios de fluência, retração e determinação do módulo de elasticidade dos vários betões.

Nas secções seguintes são referidos os documentos normativos utilizados e descrita de forma sucinta a realização dos vários ensaios.

4.5.1. Ensaio de capilaridade

De acordo com a especificação do LNEC E393-1993 a determinação da absorção de água por capilaridade de um determinado provete é igual à diferença da massa do provete de betão

endurecido, em que uma das suas faces manteve-se em contacto com água durante um intervalo de tempo (72 horas), e a sua massa seca.

Para realização desse ensaio foram feitos provetes prismáticos de $100 \times 100 \times 200 \text{ mm}^3$ curados em água durante 28 dias e secos em estufa, a uma temperatura de 40°C , até a sua massa estabilizar (massa seca dos provetes).

Após a determinação da massa seca dos provetes esses foram colocados num recipiente plástico em posição vertical, Figura 26. De forma meticulosa colocou-se água no recipiente plástico até que a altura da água atingisse os 5mm acima da base dos provetes. Fechou-se o recipiente para garantir que os provetes não perderiam água por evaporação.

Ao fim de 3, 6, 24 e 72 horas após o início do ensaio procedeu-se ao registo das massas, Figura 27. (E 393, 1993)



Figura 26 - Colocação dos provetes em recipiente



Figura 27 - Medições ensaio de capilaridade.

4.5.2. Ensaio de imersão

A determinação da absorção de água por imersão é especificada pelo documento normativo E394-1933 do LNEC.

O ensaio foi realizado em provetes cúbicos de aresta de 100mm que foram imersos em água por etapas sucessivas em intervalos de 1hora, a 1/3, 2/3 e à totalidade da sua altura. Após obtenção da massa saturada constante dos provetes procedeu-se à determinação da massa hidrostática de cada provete. Por último os provetes foram secos em estufa a uma temperatura de 105°C de forma a determinar a massa seca de cada um.

A diferença entre a massa do provete de betão imerso e a sua massa seca, expressa em termos do volume do provete, é o valor da absorção de água por imersão de cada provete (E 394, 1993).

4.5.3. Ensaio de carbonatação

O ensaio da carbonatação foi realizado em conformidade com a especificação do LNEC E391-1993 e permite determinar a suscetibilidade do betão ao fenómeno de carbonatação.

Depois da execução, cura e preparação dos provetes, esses foram colocados numa câmara de ambiente controlado; a câmara encontrava-se à temperatura de 23°C com uma humidade relativa de 60% e uma alimentação de ar com 5% de concentração de CO₂.

É possível visualizar, na Figura 28, a câmara de carbonatação e em detalhe na mesma figura a célula responsável pelo controle da emissão de dióxido de carbono, da temperatura e da humidade da câmara.

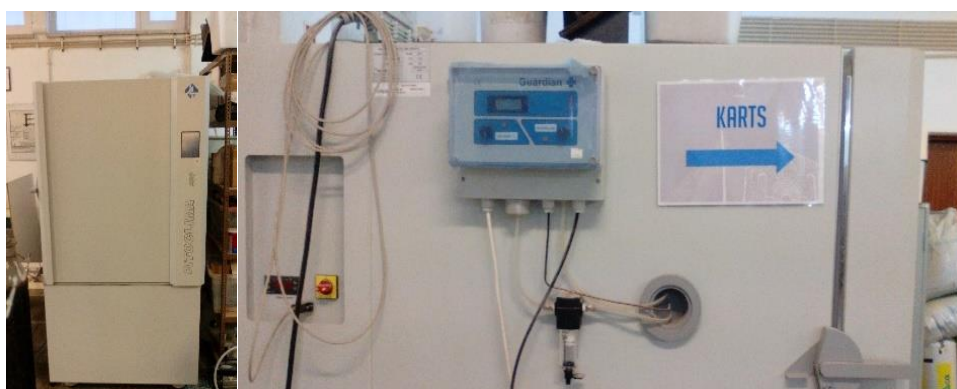


Figura 28 - Câmara para realização do ensaio de carbonatação

4. Programa experimental

A idade do betão com que se iniciou o ensaio de carbonatação foi diferente nos diferentes betões, pois foram produzidos em diferentes datas e só foi possível a utilização da câmara após uma data em que todos os betões já tinham mais de 28 dias de cura.

Os provetes foram retirados da câmara de CO₂ ao fim de 3, 14, 28 e 47 dias. A determinação da profundidade de carbonatação foi feita serrando os provetes cilíndricos a meio e posteriormente vaporizando-os com uma solução alcoólica de fenolftaleína a 0.1%, Figura 29. A zona incolor do provete indica que o pH do betão é inferior a 8 e conclui-se que o betão nessa determinada área se encontrava carbonatado, Figura 31.

Como a frente de carbonatação se desenvolve paralelamente à superfície, a profundidade de carbonatação que queremos determinar é a distância entre a superfície do provete e a linha da frente de carbonatação (fim da cor roxa) (E 391, 1993).



Figura 29 - Vaporização de solução alcoólica de fenolftaleína 0.1%



Figura 30 - Impermeabilização dos topos dos provetes



Figura 31 - Reação do betão à solução alcoólica de fenolftaleína 0.1%

4.5.4. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade estático foi determinado com recurso à prensa universal com 200 kN de capacidade. O procedimento consiste em central inicialmente o provete na prensa, seguido da aplicação uma tensão inicial de 0,5 MPa (σ_{min}) e mediu-se a extensão do provete (ε_{min}), Figura 32. De seguida, aplica-se uma tensão de valor igual a 1/3 da sua resistência à compressão ($\sigma_{máx}$) e regista-se o valor da extensão ($\varepsilon_{máx}$). O procedimento é repetido ciclicamente até se verificar o critério de paragem entre ciclos.



Figura 32 - Medição da extensão para determinação do módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é dado pela equação (13), calculado para o último ciclo de carga-descarga:

$$Ec = \frac{\sigma_{máx} - \sigma_{min}}{\varepsilon_{máx} - \varepsilon_{min}} \quad (13)$$

4.5.5. Ensaio de retração

A retração de um provete consiste na quantificação da deformação longitudinal, quantificada em função do comprimento do provete após secagem a uma dada idade (sob condições específicas) e do comprimento medido logo após a sua desmoldagem. Para determinar o valor da retração recorreu-se à especificação E398-1993 do LNEC.

Os provetes realizados para executar este ensaio, tal como referido anteriormente, foram provetes prismáticos de secção $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}^3$. Durante a moldagem dos provetes foram colocados pernos metálicos incorporados nos topos para que fosse possível executar as medições pretendidas.

Após 24h da execução dos provetes esses foram desmoldados e colocados na câmara termo-higrométrica (temperatura de 20°C e humidade 50%), registou-se o valor inicial dos provetes e durante 252 dias foram mantidos na câmara termo-higrométrica. Durante esse período efetuaram-se várias medições, Figura 33.

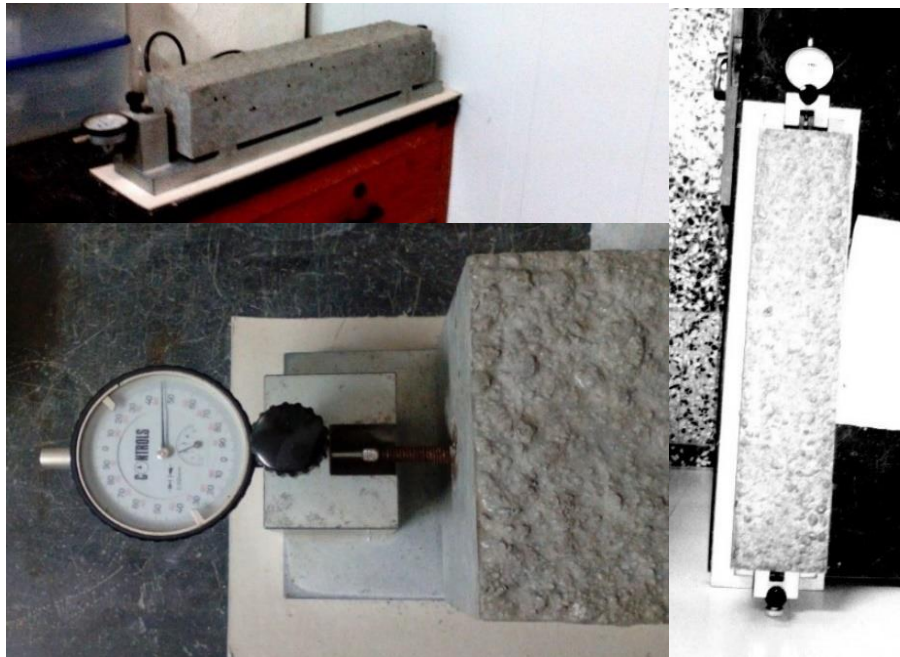


Figura 33 - Ensaio de retração

4.5.6. Ensaio de fluência

A determinação da fluência de um betão em compressão foi executada em conformidade com a especificação do LNEC (E399, 1993).

De forma sucinta o ensaio consiste em colocar o provete centrado num equipamento de carga e aplicar uma carga igual a 1/3 da resistência à compressão do betão, Figura 34. Fez-se a medição da deformação inicial e, posteriormente, foram feitas medições da extensão dos provetes sob tensão (ϵ_t) ao longo do tempo.



Figura 34 - Provete carregado para determinação da

Para determinar o valor da deformação de fluência é necessário conhecer o valor da retração (ϵ_s) determinado pelo ensaio de retração e o valor da extensão instantânea devida à mesma tensão aplicada (ϵ_i). A extensão instantânea pode ser obtida pela equação (14) ou medida diretamente no momento da carga.

$$\epsilon_i = \frac{\sigma}{E} \quad (14)$$

5. Análise de Resultados

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização da durabilidade dos betões serão apresentados no presente capítulo. Nesta seção do trabalho avaliar-se o desempenho dos betões fabricados e verifica-se se estes vão ao encontro dos resultados teóricos esperados.

Neste capítulo são ainda apresentados os valores obtidos referentes aos ensaios de resistência à compressão relativos ao estudo de caracterização mecânica de betões com baixa dosagem de cimento (Alves, 2015).

5.1. Caracterização do betão no estado fresco

O betão no seu estado fresco deve ter uma trabalhabilidade adequada de forma a que seja possível efetuar uma correta colocação e compactação em obra. Realizou-se o ensaio de abaixamento e, quando esse ensaio não foi válido, recorreu-se à determinação do grau de compactação para avaliar a trabalhabilidade do betão.

5.1.1. Ensaio de abaixamento

O ensaio de abaixamento - Slump foi realizado em todos os betões; no entanto, por falta de coesão em alguns betões o ensaio não foi válido. Na Tabela 10 são apresentados os resultados obtidos e as respetivas classes de abaixamento. Relativamente à Figura 35 são apresentados também os valores do abaixamento, mas agrupados por dosagens de cimento usadas em cada amassadura.

Tabela 10 - Resultados obtidos pelo ensaio de Slump

Designação	LC75	LC75_F	C75	LC125	LC125_F	C125	LC250_A	C250
Abaixamento (mm)	---	50	90	---	45	120	---	80
Classe de consistência	---	S2	S2	---	S1/S2	S3	---	S2

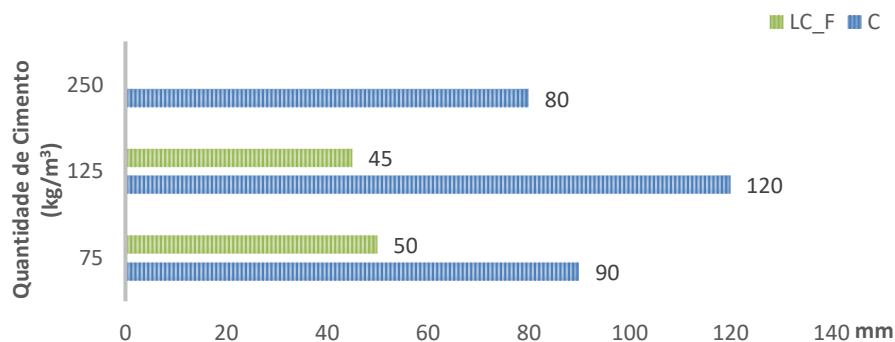


Figura 35 - Abaixamento obtido no ensaio de Slump

Dos resultados obtidos, Figura 35 e Tabela 10, conclui-se que os betões “C” apresentam uma maior trabalhabilidade e fluidez comparativamente aos betões “LC_F”. Isso era expectável porque os betões “C” apresentam uma compacidade 0,81 que é inferior à compacidade dos betões “LC”, 0,86. A compacidade é respetiva à parte sólida do betão, quanto menor for a compacidade, maior será a parte fluída e consequentemente maior a trabalhabilidade.

O betão LC_F 75 apresenta um abaixamento superior ao LC_F 125 apesar de ambos terem a mesma quantidade de pasta ligante e de água. Nesta situação é evidenciado a influência das cinzas volantes na trabalhabilidade do betão LC_F 75. A forma esférica das partículas das cinzas volantes funciona como um lubrificante entre as partículas de maiores dimensões.

O betão com maior trabalhabilidade é o C 125, com abaixamento de 120 mm que se deve à contribuição das adições (fíler e cinzas volantes) que funcionam como lubrificante.

Por último inferimos que todos os betões LC em que as misturas foram obtidas pela curva de Alfred apresentavam uma coesão inferior aos dos betões LC_F que foram formulados pela curva de Faury.

Os betões que não apresentavam coesão suficiente (LC 75, LC 125 e LC 250_A), em que o ensaio de Slump não foi válido, determinou-se a trabalhabilidade pelo grau de compactabilidade.

5.1.2. Grau de compactabilidade

Os resultados obtidos do ensaio de Slump nas misturas LC 75, LC 125 e LC 250_A foram inválidos, tendo ocorrido desagregação quando se retirava o cone. Recorreu-se, então, ao ensaio de determinação do grau de compactabilidade para avaliar a trabalhabilidade das misturas.

Os resultados obtidos encontram-se patentes na Tabela 11 e Figura 36.

Tabela 11 - Resultados obtidos ensaio de determinação do grau de compactabilidade

Designação	$s \text{ (mm)}$	$h \text{ (mm)}$	$c = \frac{h}{(h - s)}$	Classe de compactabilidade
LC75	70	400	1,21	C2
LC125	75	400	1,23	C2
LC250A	55	400	1,16	C2

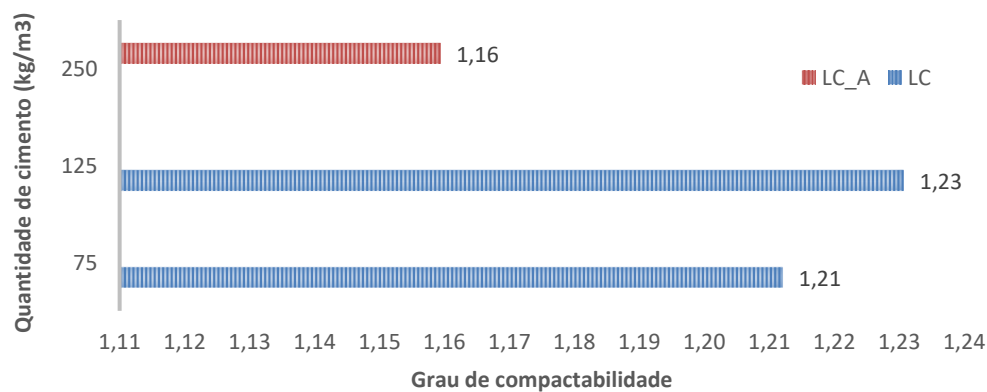


Figura 36 - Grau de compactabilidade obtido no ensaio de compactabilidade

Com base na análise da Figura 36 confirma-se o efeito benéfico que as cinzas volantes apresentam na trabalhabilidade das misturas. A mistura LC 75 apresenta a mesma quantidade de pasta ligante e a mesma quantidade de água do que a mistura LC 125, no entanto apresenta um grau de compactabilidade inferior que é explicado pelas cinzas volantes usadas na mistura LC 75.

Por último, verificamos que o betão LC 250_A apresenta uma trabalhabilidade bastante superior aos restantes betões. A razão água/ligante de 0,72 do betão LC 250_A explica essa trabalhabilidade pois os restantes betões LC apresentam uma relação A/L na ordem dos 0,47.

5.2. Caracterização do betão no estado endurecido

Neste subcapítulo apresentam-se as propriedades do betão caracterizadas no estado endurecido. É apresentado os resultados obtidos dos vários ensaios realizados assim como a sua análise e os respetivos comentários.

5.2.1. Resistência à compressão

Os resultados da compressão abaixo apresentados foram transcritos da tese de mestrado de (Alves, 2015). Os respectivos comentários e conclusões de análise em função dos parâmetros de variação podem ser consultados nesse documento pois a sua análise está fora do âmbito do presente estudo.

Os resultados citados (Tabela 12, Tabela 13, Figuras 37, 38, 39, 40, 41 e 42) têm como finalidade permitir estabelecer relações entre as resistências dos betões e os restantes parâmetros estudados nesse trabalho, nomeadamente a porosidade, capilaridade, carbonatação, retração e fluência.

Tabela 12 - Resistência à compressão dos provetes cúbicos dos betões LC e C. (Alves, 2015)

Designação	LC75	C75	LC125	C125	LC175	LC250A	C250
$f_{cm,7} (Mpa)$	11,60	7,59	25,20	14,31	35,02	25,75	34,89
$f_{cm,28} (Mpa)$	20,59	15,21	28,88	20,27	44,72	30,52	39,09
$f_{cm,56} (Mpa)$	26,50	20,54	33,90	26,51	50,20	34,30	41,54

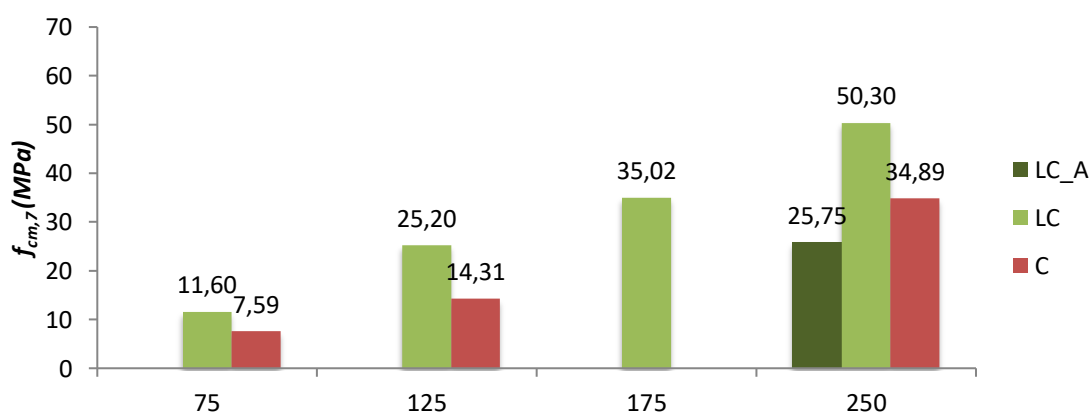


Figura 37 – Resistência à compressão aos 7 dias (Alves, 2015).

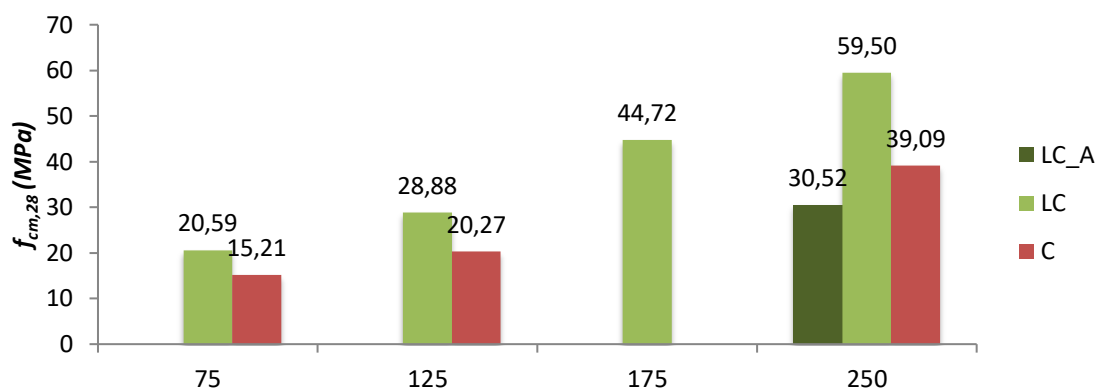


Figura 38 - Resistência à compressão aos 28 dias (Alves, 2015).

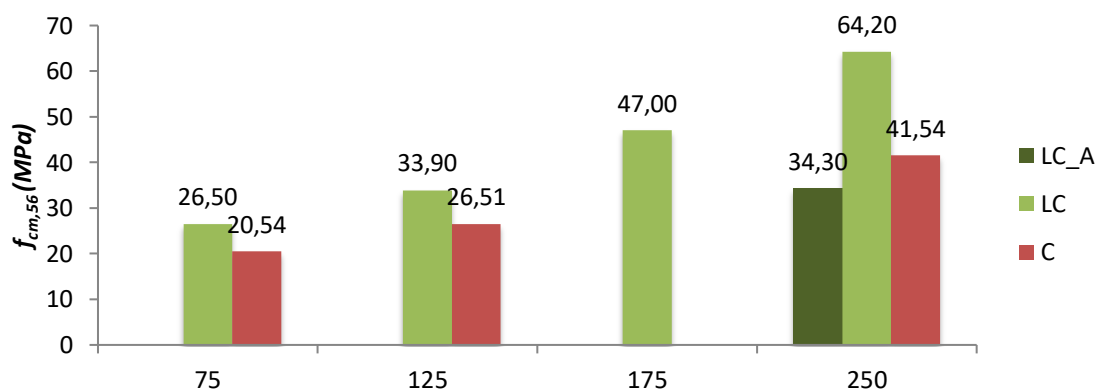


Figura 39 - Resistência à compressão aos 56 dias (Alves, 2015).

Tabela 13 - Resistência à compressão dos provetes cúbicos dos betões LC e LC_F (Alves, 2015)

Designação	LC75	LC75F	LC125	LC125F	LC175	LC175F
$f_{cm,7} (Mpa)$	11,60	15,69	25,20	26,44	35,02	36,77
$f_{cm,28} (Mpa)$	20,59	22,12	28,88	29,39	44,72	45,87

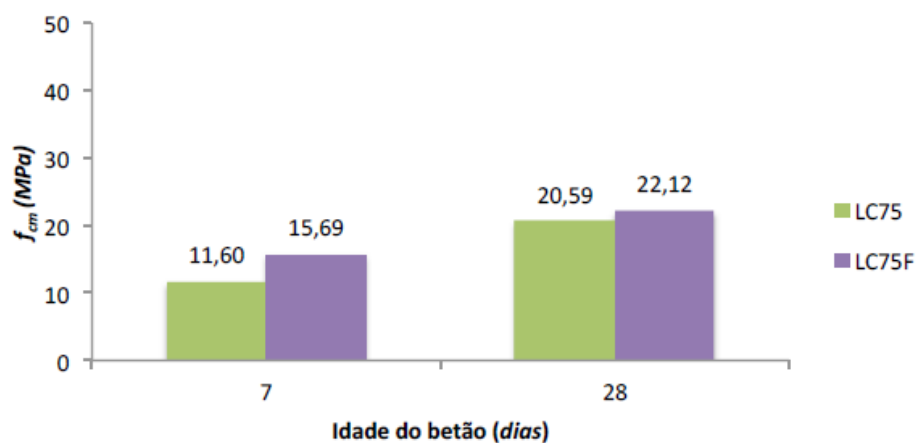


Figura 40 - Resistência à compressão dos provetes cúbicos de betão LC75 e LC75F (Alves, 2015)

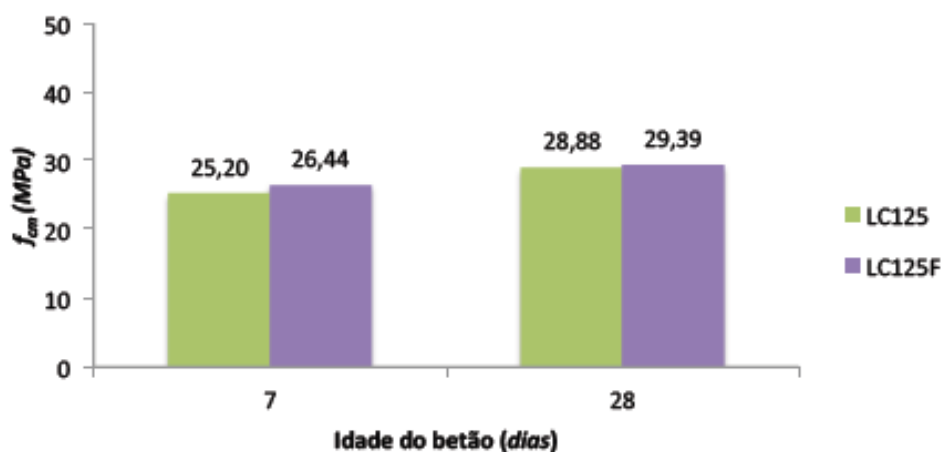


Figura 41 - Resistência à compressão dos provetes cúbicos de betão LC125 e LC125F (Alves, 2015)

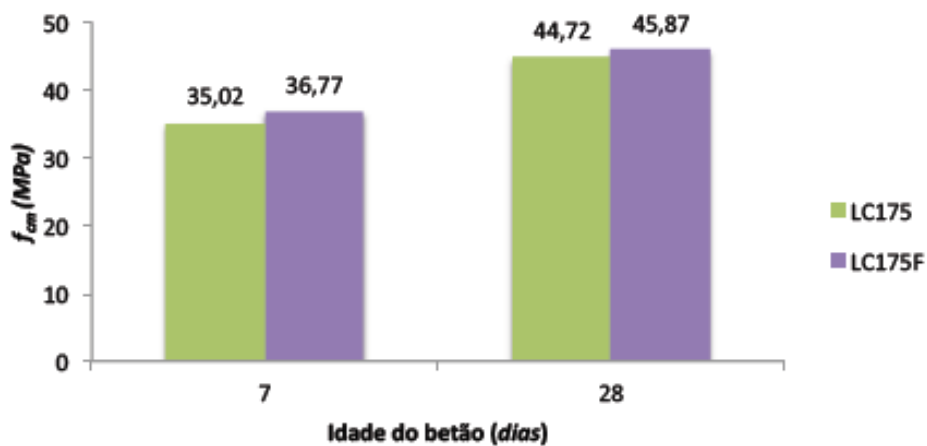


Figura 42 - Resistência à compressão dos provetes cúbicos do betão LC175 e LC175F (Alves, 2015)

5.2.2. Capilaridade

Tal como já foi descrito anteriormente, o ensaio de capilaridade permite-nos determinar a quantidade de água que um betão absorve pela sucção dos canalículos de reduzidas dimensões. Apresentam-se os resultados na Tabela 14 e nas Figuras 43 e 44, tendo resultado dos valores médios de 3 provetes.

Tabela 14 - Evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo

Tempo	Absorção (mg/mm ²)			
	3 horas	6 horas	24 horas	72 horas
LC 75	1,17	1,37	2,33	2,77
C 75	1,80	2,63	4,90	7,70
LC 125	1,17	1,63	2,83	3,97
C 125	1,10	1,50	2,73	3,90
LC 175	0,37	0,67	1,20	1,67
LC 250A	1,80	2,23	3,33	4,20
C 250	1,00	1,33	2,23	2,63

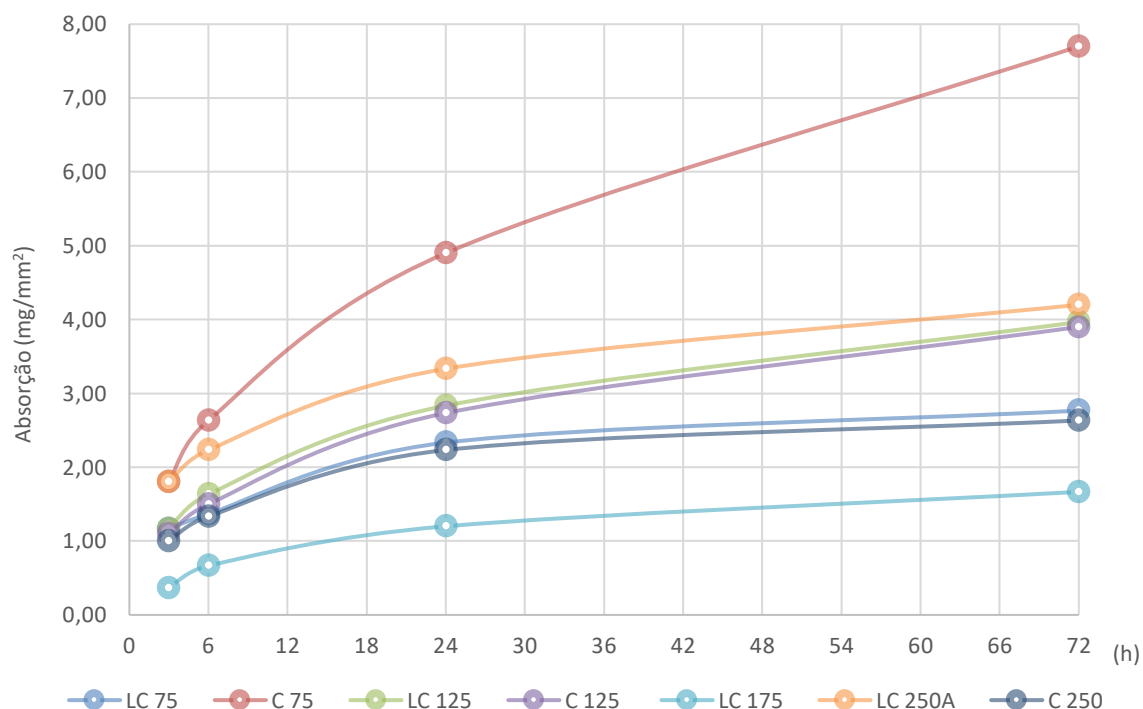


Figura 43 - Absorção de água por capilaridade

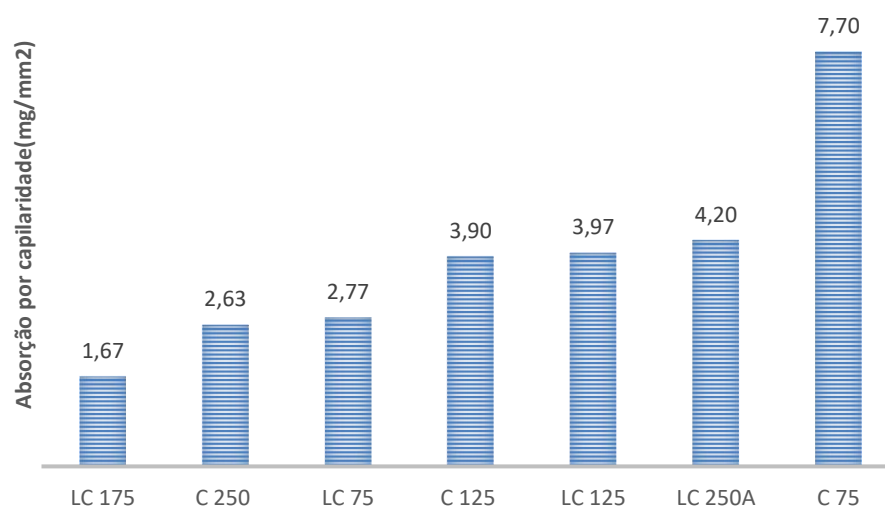


Figura 44 - Absorção por capilaridade às 72h

Através da Figura 43 verifica-se que a absorção de água por capilaridade ocorre com maior intensidade nas primeiras 24 horas. A absorção de água apresenta uma tendência para estabilizar ao longo do tempo, sendo esse o comportamento esperado de acordo com a literatura. À medida que a água começa a penetrar o betão por capilaridade nota-se que após a saturação dos poros no nível mais baixo do provete o nível da água tende a subir. A altura máxima que a água poderá atingir é limitada pela diferença de pressão entre a superfície livre da água no exterior do betão e a sua superfície nos poros capilares do betão, e também pela ação gravítica. Daí a tendência de a absorção de água por capilaridade estabilizar com o tempo.

Pela Figura 44 verifica-se que o betão C 75 apresentou a maior absorção de água por capilaridade às 72h. Sendo esse o betão com menor quantidade de cimento, apenas 75kg/m^3 , e com uma compactidade de 0,81 pode-se inferir que a formação de cristais que iriam colmatar os poros formados na matriz do betão não ocorreu em número suficiente. Por outro lado, o betão LC 75 apresentou uma absorção por capilaridade baixa. Apesar de a quantidade de cimento ser de 75kg/m^3 , a compactidade desse betão é superior, 0,86. Como a absorção dos agregados é baixa, a absorção por capilaridade da mistura também o será.

Verifica-se ainda que os betões C 125 e LC 125 apresentam praticamente o mesmo valor de absorção de água por capilaridade, tendo o betão C 125 um valor ligeiramente inferior. A compactidade do betão C 125 é de 0,81 e tem na sua mistura 100kg/m^3 de cinzas volantes. As cinzas volantes reagem com os hidróxidos de cálcio, que é um subproduto da hidratação do

cimento Portland, ocorrendo a formação de novos cristais que vão preencher os poros diminuindo a absorção por capilaridade.

O betão LC 175 apresentou o melhor resultado, isso deve-se ao facto de a sua compacidade ser de 0,86 e os 175kg/m³ de cimento usado permitir um desenvolvimento de novos compostos que vão colmatar os poros da matriz do betão.

5.2.3. Imersão

Os resultados do ensaio de imersão apresentam-se na Tabela 15 e na Figura 45, resultado dos valores médios de 3 provetes.

Tabela 15 - Quantidade de água absorvida por imersão (%)

Betão	Absorção
LC 75	10,22 %
C 75	14,80 %
LC 125	9,33 %
C 125	14,55 %
LC 175	9,39 %
LC 250	13,08 %
C 250	14,08 %

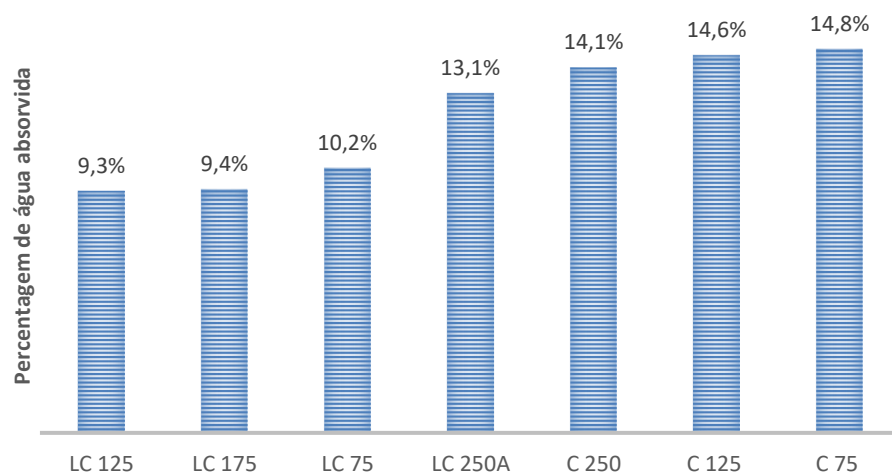


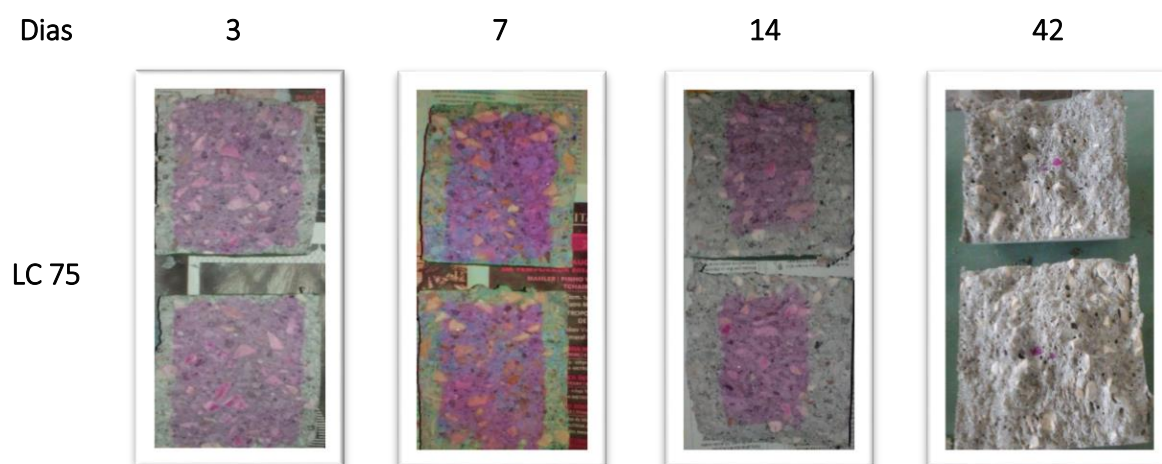
Figura 45 - Quantidade de água absorvida por imersão






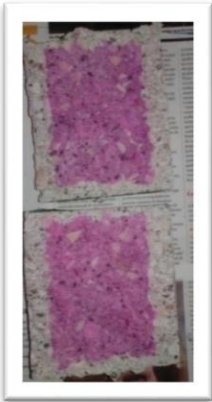
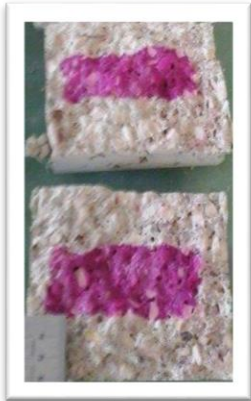






Verificou-se que os betões LC com uma compacidade de 0,86 absorvem menos água quando comparado com os betões com a sigla C, betões que têm uma compacidade de 0,81. Isso é justificado porque os agregados são pouco porosos e absorvem pouca água, logo quanto maior for a quantidade de pasta ligante maior vai ser a quantidade de água absorvida pelo betão. Verifica-se ainda que quanto maior for a quantidade de cimento menor é o valor de absorção, isso porque a hidratação do cimento ocupa os vazios existentes no interior do betão contribuindo para um material menos poroso.

O betão LC 250_A é um betão com uma relação A/L muito superior aos restantes, 0,72, daí comportar-se mais como um betão C do que um LC, além de ter apenas 250 kg/m³ de ligante.

5.2.4. Carbonatação

Ao vaporizar uma solução alcoólica de fenolftaleína sobre o betão as zonas onde o pH era superior a 8 apresentavam uma cor carmim. Já as zonas onde o betão estava carbonatado, zonas onde o pH era inferior a 8, a solução alcoólica de fenolftaleína permanecia incolor, Figura 46. Os resultados apresentam-se organizados na Tabela 16 e nas Figuras 47, 48 e 49, obtidos da média dos valores de 2 provetes.



Dias	3	7	14	42
C 75			-	
LC 125				
C 125			-	
LC 175			-	

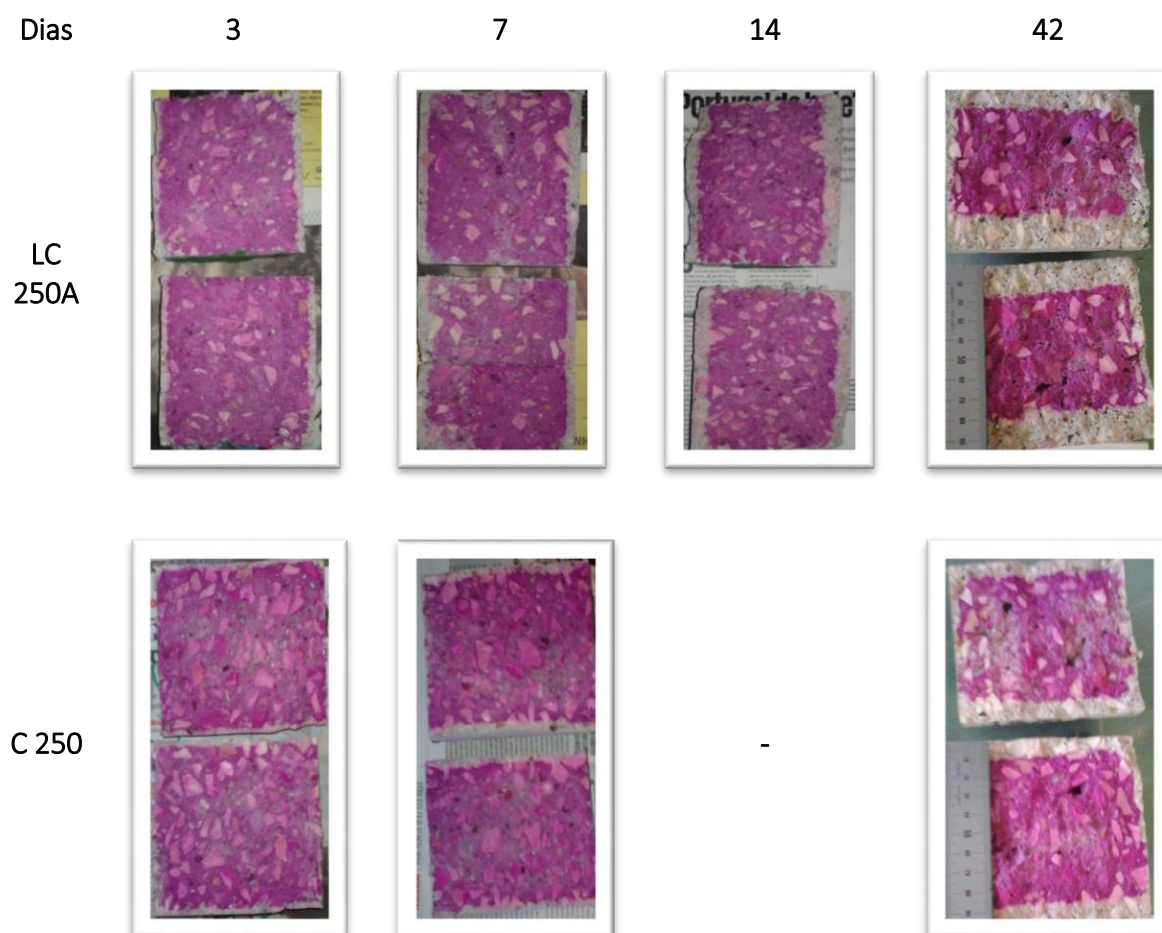


Figura 46 - Provetes de betão vaporizados com fenolftaleína ao fim de 3,7,14 e 42 dias.

Tabela 16 - Resultados profundidade de carbonatação (mm)

Dias	3	7	14	28	42
LC 75	10,00	15,00	23,25	36,50	43,25
C 75	17,50	22,50	39,00	50,00	>50,00
LC 125	5,50	11,00	15,25	21,75	26,38
C 125	10,00	15,50	20,00	27,75	33,50
LC 175	2,00	3,50	5,75	9,00	10,00
LC 250	4,50	6,50	10,25	15,75	18,13
C 250	3,50	5,00	8,25	10,00	11,00

Observando as curvas de desenvolvimento da carbonatação ao longo do tempo, constata-se que a velocidade com que se dá a carbonatação do betão é superior nas idades jovens e tende a ser mais lenta com o passar do tempo, Figura 47. À medida que a carbonatação ocorre

os produtos resultantes ocupam os vazios existentes nos poros do betão, o que dificulta a difusão do dióxido de carbono para o interior do betão diminuindo, assim, a velocidade de carbonatação.

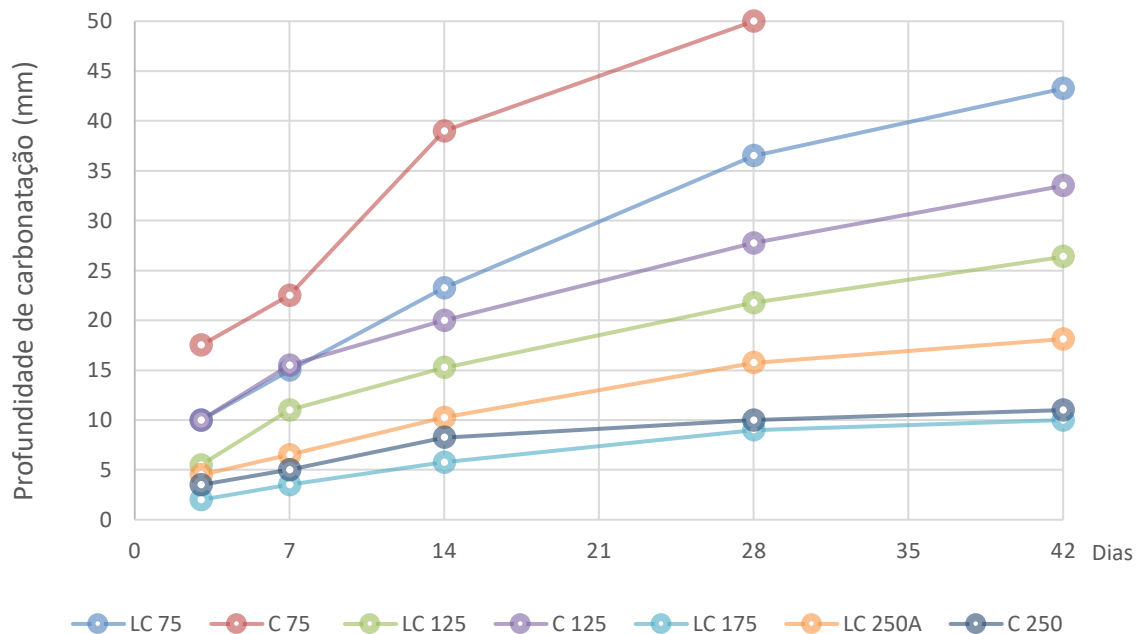


Figura 47 - Evolução da profundidade da Carbonatação

Na Figura 48 encontram-se os resultados da profundidade de carbonatação aos 42 dias, organizados de modo crescente da esquerda para a direita. Deduz-se que o desenvolvimento da profundidade da carbonatação é tendencialmente proporcional à razão A/C. Quanto menor for a razão A/C menor é a profundidade de carbonatação.

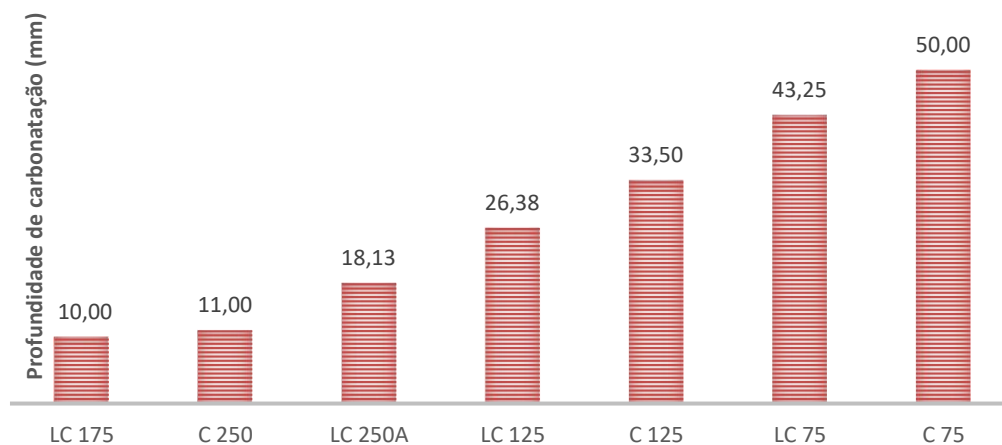


Figura 48- Profundidade da carbonatação aos 42 dias

Os betões com compacidade maiores, os LC, apresentam uma maior resistência à carbonatação comparativamente aos betões C que têm uma compacidade de 0,81. O único betão em que isso não se verifica é no LC 250_A, pois este betão é mais próximo do betão C, e apresenta uma menor resistência à carbonatação derivado ao facto de a sua razão A/L ser muito superior aos dos restantes LC.

No que concerne às adições dos betões infere-se que a utilização de cinzas volantes aumenta a velocidade de carbonatação, como se pode confirmar pela Figura 48. Os C 75, LC 75 e C 125, que têm na sua constituição cinzas volantes, apresentam menor resistência à carbonatação quanto maior for a quantidade de cinzas volantes incorporadas. Como as reações pozolânicas desenvolvem-se lentamente, apesar de se ter iniciado o ensaio de carbonatação depois dos 28 dias, a formação de cristais por efeito pozolânico ainda está em pleno desenvolvimento. A estrutura será provavelmente mais porosa nos betões com cinzas volantes e consequentemente há um maior ingresso de dióxido de carbono para o interior do betão.

Observa-se uma relação tendencial entre a capilaridade do betão e o grau de carbonatação do betão aos 42 dias. Na Figura 49, onde se apresentam ambos os resultados relativizados em função do valor máximo atingido, é evidenciada essa relação, onde, por regra geral, o betão que absorveu maior quantidade de água por capilaridade foi o betão em que a profundidade de carbonatação foi maior. Apesar da boa correlação visível na maioria dos betões, os resultados dos betões C125 e LC75 desviam-se da relação identificada.

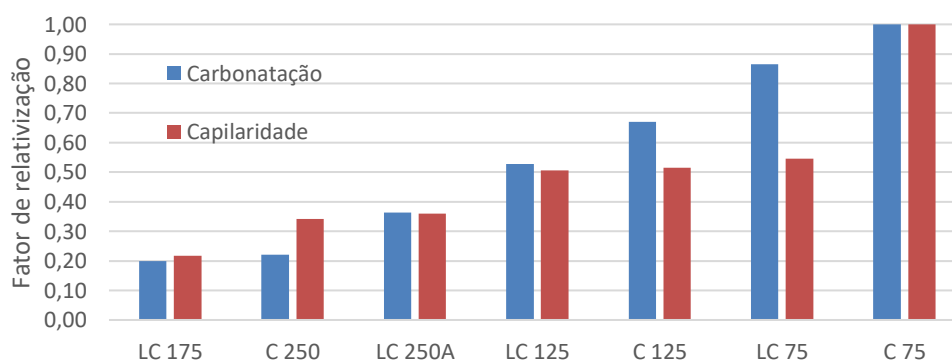


Figura 49 - Relação entre capilaridade e carbonatação.

5.2.5. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade foi determinado aos 28 dias, Tabela 17 e Figura 50, e é necessário não só para conhecer a rigidez de cada mistura, mas também para a análise de fluência do betão.

Tabela 17 - Módulo de elasticidade do betão aos 28 dias (Aves, 2015).

Designação	LC75	LC75F	LC125	LC125F	LC175	LC175F	LC250A	C250
$E_{cm,EC2}(GPa)$	26,27	26,8	28,86	29	32,67	32,91	29,31	31,44
$E_{cm}''(GPa)$	37,4	28,7	40,6	34,5	42,4	38,2	38,1	36,5
$E_{cm}/E_{cm,EC2}$	1,42	1,07	1,41	1,19	1,3	1,16	1,3	1,16

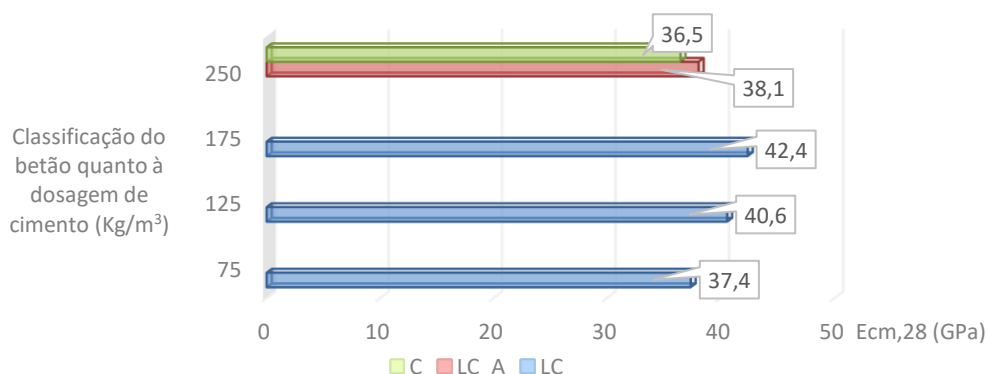


Figura 50 - Módulo de elasticidade do betão aos 28 dias.

Resumidamente, os betões LC com compacidade 0,86 apresentam rigidez muito superior aos betões C. Isso deve-se ao facto de os betões LC terem uma maior quantidade de agregados e esses apresentarem uma rigidez superior à pasta ligante. No estudo referido (Alves, 2015), os resultados experimentais apresentam valores muito mais elevados em relação à previsão do EC2, chegando a exceder em 40% (Tabela 17).

Observa-se ainda que à medida que a quantidade de cimento aumenta o módulo de elasticidade do betão também aumenta.

5.2.6. Retração

O ensaio de retração iniciou-se 24 horas após a realização dos provetes e deu-se continuidade ao ensaio até aos 252 dias. Nas Figuras 51 e 52 encontram-se os gráficos de evolução da retração medida, organizados por tipo LC e C, respetivamente. Na Figura 53 são apresentados os valores das leituras efetuadas de todos os betões.

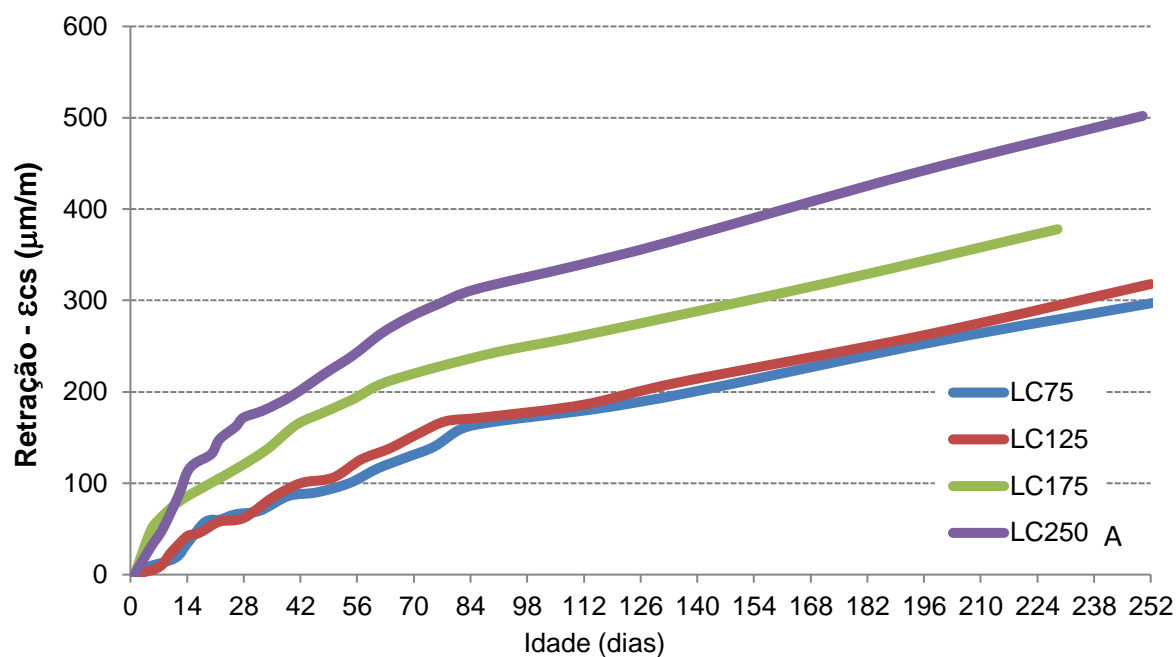


Figura 51 - Resultados obtidos do ensaio de retração nos betões LC.

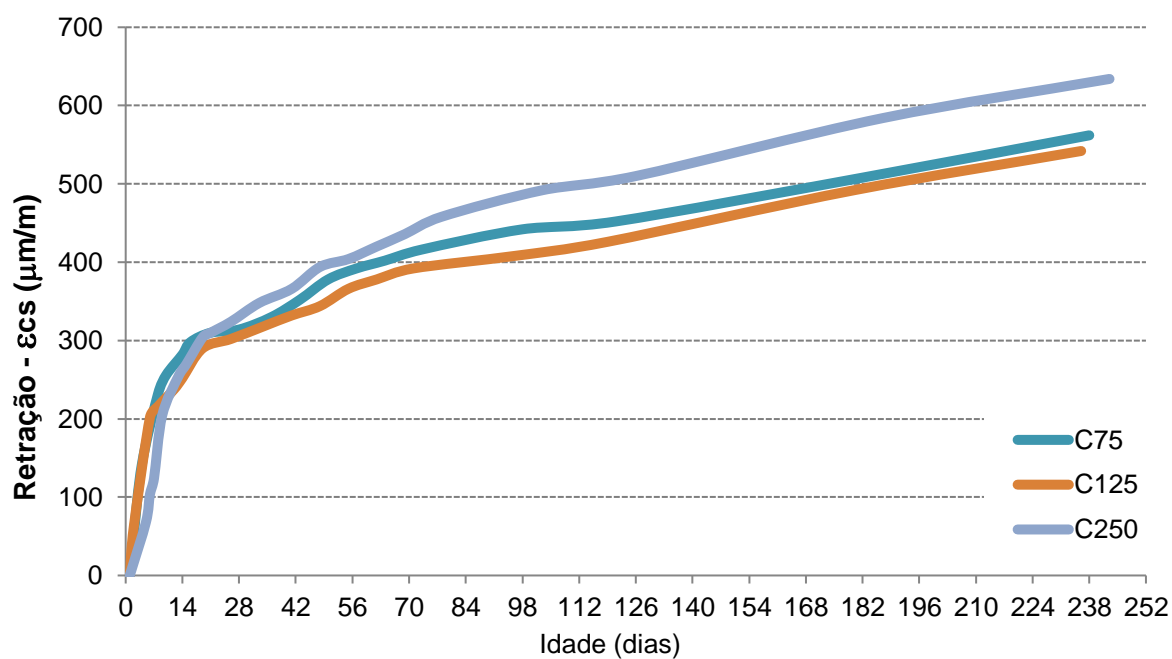


Figura 52 - Resultados obtidos do ensaio de retração nos betões C.

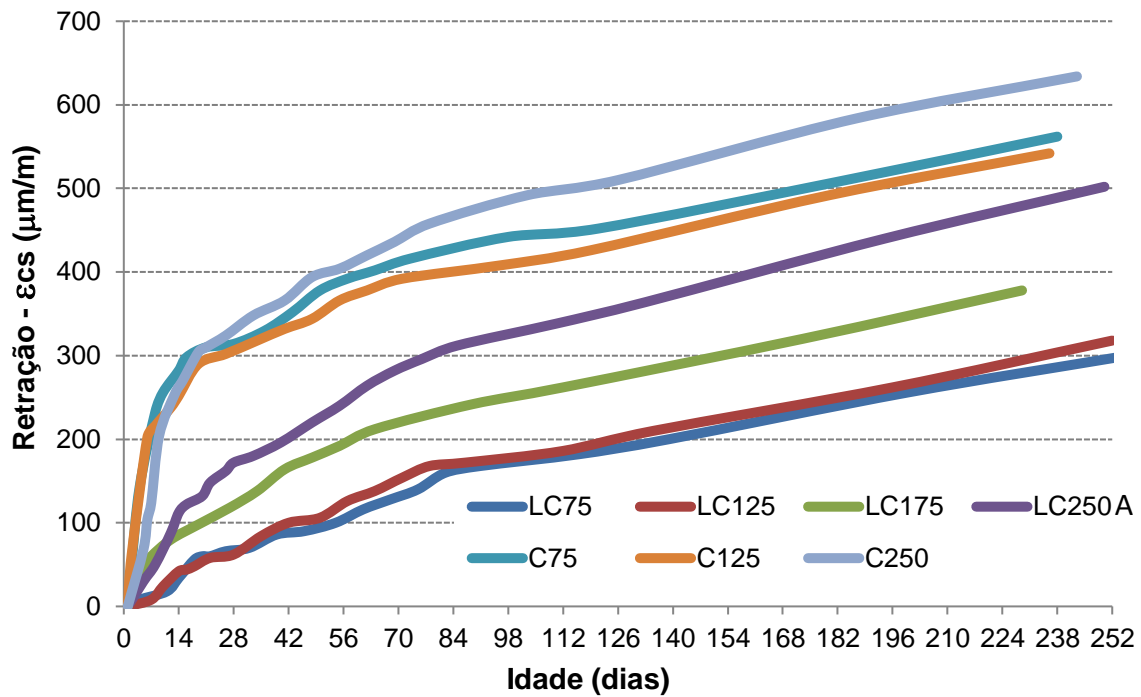


Figura 53 - Resultados obtidos do ensaio de retração nos betões LC e C.

Na Figura 54 apresentam-se as previsões da retração prevista pelas expressões do EC2, em função dos parâmetros respetivos de cada betão caracterizado.

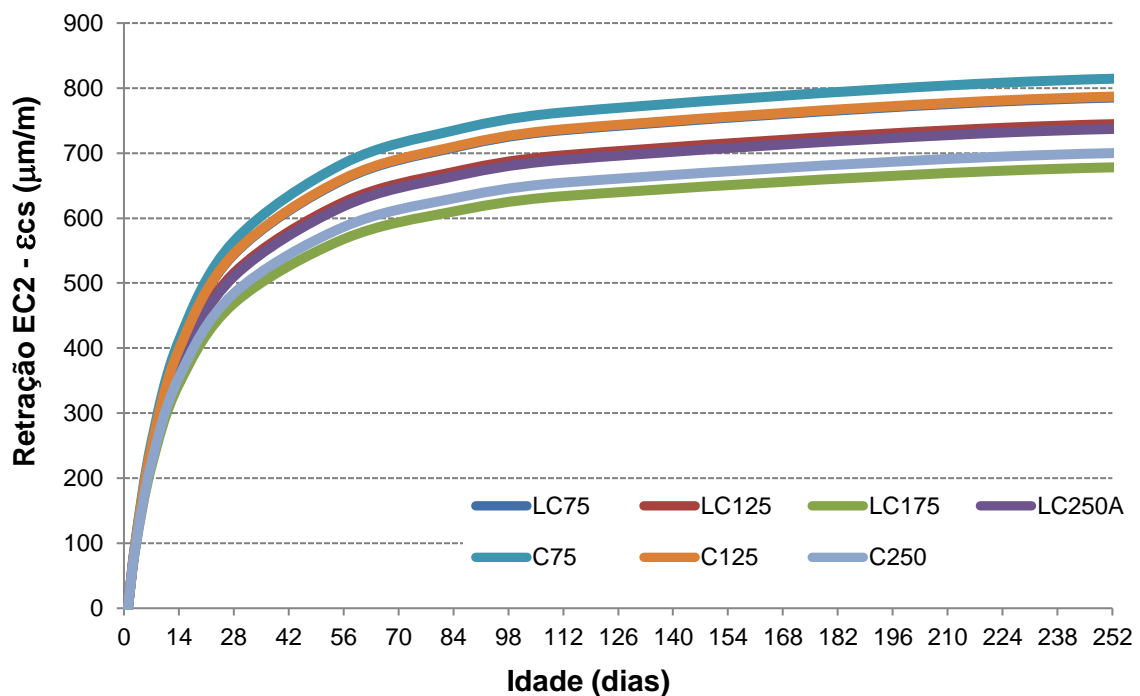


Figura 54 - Previsões da retração segundo EC2

Comentários aos resultados obtidos nos ensaios de retração:

- Na Figura 51 verifica-se que a evolução da retração dos betões LC ocorre de forma mais pronunciada até aos 14 dias. No período seguinte, o desenvolvimento da retração ocorre mais lentamente. Como é afirmado na revisão bibliográfica a retração nos primeiros tempos deve-se à saída da água do interior do betão e ao desenvolvimento rápido das reações de hidratação, que originam compostos com um volume inferior aos compostos iniciais. Observa-se que, apesar das baixas dosagens de cimento, a retração não sugere ser muito elevada, com exceção do betão LC 250_A, que apresenta uma retração muito superior aos restantes betões LC, facto que se deve à sua elevada relação A/L.
- Os betões C apresentam uma retração semelhante independentemente da dosagem de cimento, mas muito superior à dos betões LC, em todo o seu o período de análise. O desenvolvimento da retração, à semelhança dos betões LC, é muito mais rápido nos primeiros 14 dias, Figura 52 e Figura 53.
- As previsões da retração determinadas pelo EC2 são superiores em todos os betões. Os valores determinados pelo EC2 no caso dos betões LC apresentam um erro muito superior, os valores do erro determinados experimentalmente variam entre 46 % e 160%, enquanto que o erro dos betões C varia entre 10% e 44%, Figura 54 e Figura 53.

5.2.7. Fluência

A fluência de um betão consiste na deformação que ocorre a longo, após a aplicação de tensão de compressão e a respetiva deformação elástica, mantendo constante a tensão aplicada durante longo período.

No presente estudo foram realizados ensaios de fluência nos betões LC, LC_F e no betão C 250. Os resultados dos ensaios apresentam-se em função do coeficiente de fluência e encontram-se agrupados de modo que seja possível efetuar uma comparação entre os vários tipos de betões (Figuras 55 a 57).

Na Figura 55 encontram-se os resultados do ensaio de fluência realizados nos vários betões. Numa primeira análise constata-se que a fluência do betão LC 250_A é muito superior aos restantes betões. A elevada relação A/L da mistura condiciona negativamente o betão LC 250_A proporcionando uma grande deformação no betão por fluência. Apesar da resistência à compressão que o betão apresenta ser satisfatória, a quantidade de água e principalmente a elevada relação A/L da pasta demonstra ser um dos principais fatores de influência.

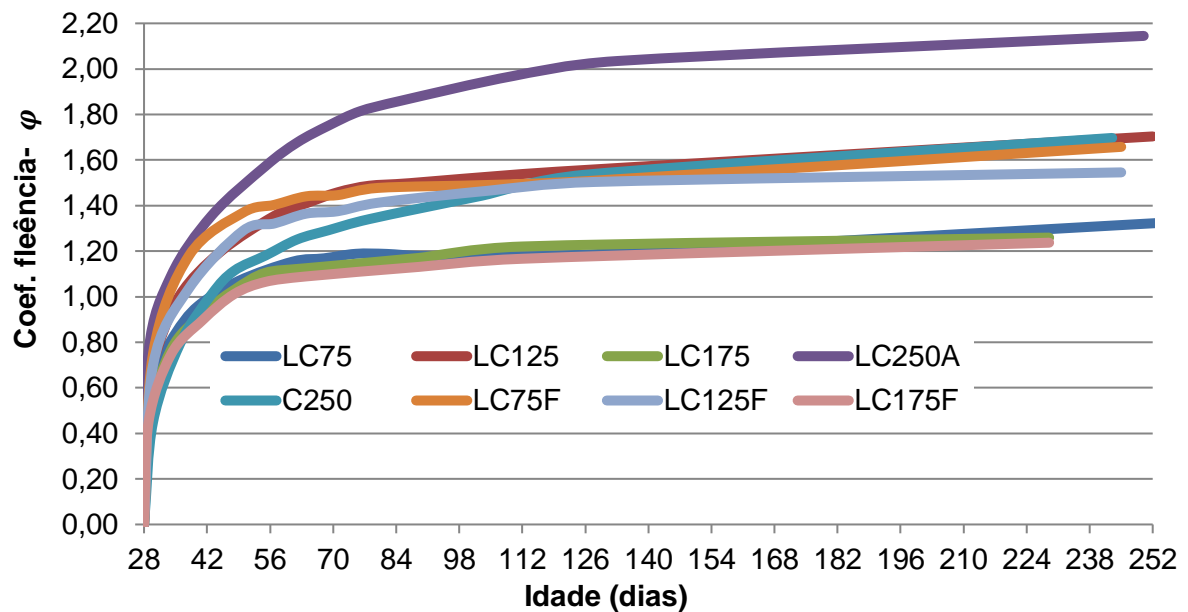


Figura 55 - Resultados do ensaio de fluência de todos os betões.

Na Figura 56, foram agrupados os resultados dos betões LC (Formulados com a curva de Alfred) e o betão C 250. Conclui-se que os betões com menores valores de fluência são os betões LC 175 e o LC 75. O betão LC 175 apresenta maior rigidez do que o betão LC 75 derivado à sua baixa relação A/C e a quantidade de cimento que contribui para maiores desempenhos de resistência. O betão LC 75 apresenta um valor de fluência bastante baixo, contrariamente ao que seria esperado, face à sua reduzida resistência; contudo, a baixa dosagem de pasta ligante e principalmente de cimento, associado à adição de cinzas volantes, aparenta ter uma importante influência na redução das deformações por fluência.

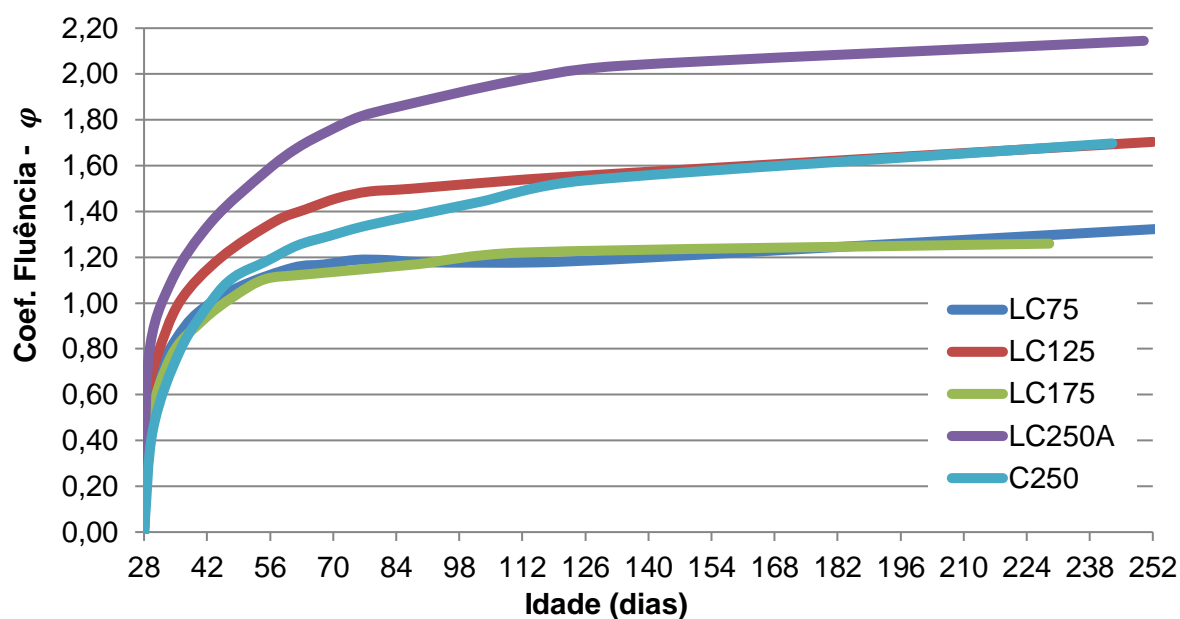


Figura 56 -Resultados do ensaio de fluência dos betões LC e do betão C250

Recorrendo à Figura 57, consegue-se deduzir que no mesmo grupo de betões, neste caso os betões LC_F (formulado com a curva de Faury), a fluência diminui à medida que se aumenta a quantidade de cimento. Também existe uma correlação entre as resistências dos betões LC_F e o desenvolvimento da fluência, quanto maior a resistência (Figuras 40 a 42) menor é o valor da fluência.

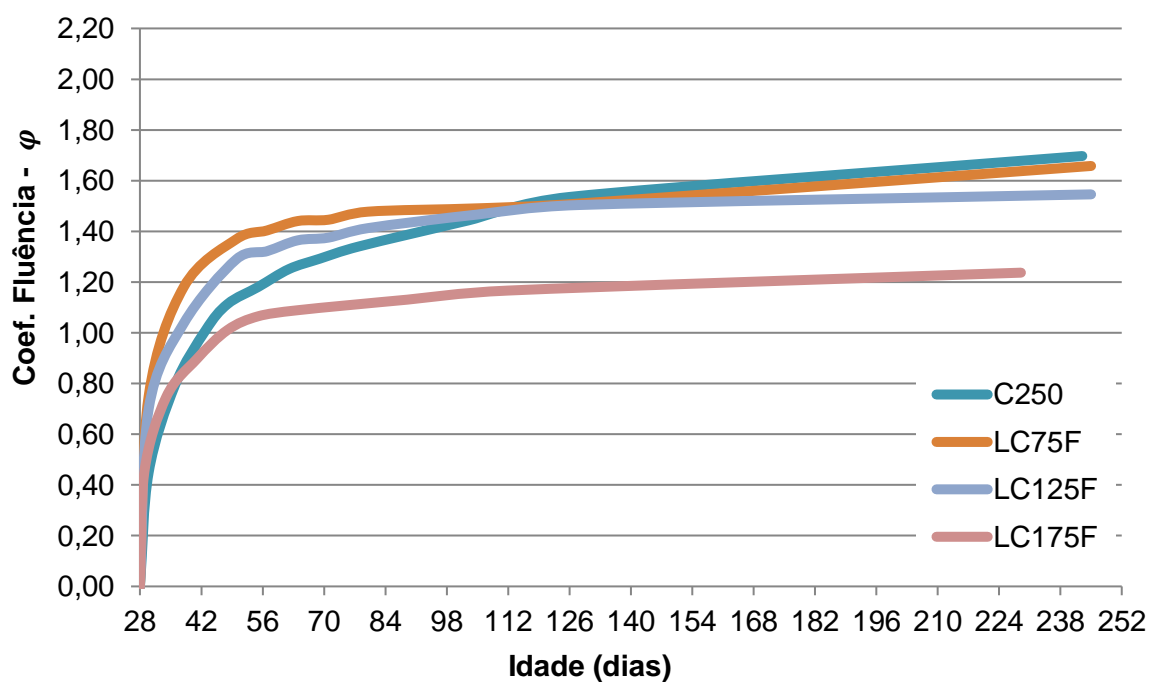


Figura 57 -Resultados do ensaio de fluência dos betões LC_F e do betão C250

No que concerne aos betões formulados pela curva de Faury (LC_F), esses tendem a apresentar valores de fluência inferiores dos que foram formulados pela curva de Alfred (LC), Figura 58. Isso deve-se ao facto de as misturas formuladas pela curva de Faury conterem maior percentagem de brita, em comparação às misturas formuladas pela curva de Alfred, com maior percentagem de areia média. Importa salientar que os betões formulados pela curva de Faury apresentaram um módulo de elasticidade muito mais baixo (maior deformação elástica) em comparação ao dos betões formulados pela curva de Alfred, verificando-se um comportamento inverso nas deformações por fluência. No entanto, à medida que as quantidades de cimento usado nas misturas aumentam, a influência da granulometria tende a desaparecer, Figura 58, o que também se tinha verificado na caracterização do módulo de elasticidade. Estes resultados conjugados levam a concluir que a curva granulométrica, que se traduz em diferentes proporções de agregados finos e grossos, tem uma influência significativa nas deformações (instantâneas e de fluência) nas primeiras idades, mas a longo prazo as deformações totais tendem a aproximar-se. Além disso, essa influência é maior para baixas dosagens de cimento e reduz com o aumento dessa dosagem.

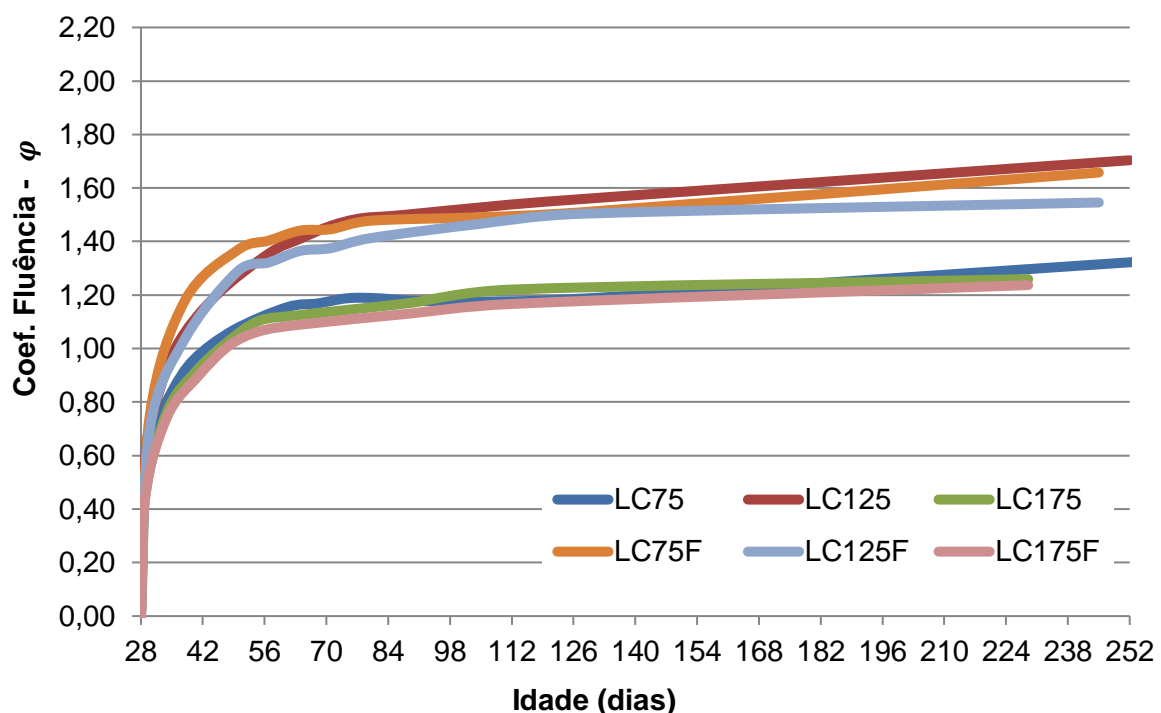


Figura 58 - Resultados do ensaio de fluência dos betões LC e LC_F

Termina-se a análise de resultados de fluência com a comparação entre os valores teóricos da fluência, determinados através do EC2, e os valores obtidos experimentalmente.

Através da Figura 59 e em comparação à Figura 55, verifica-se que as previsões do coeficiente de fluência pelo EC2 são muito superiores aos valores obtidos experimentalmente, sendo a relação de valores previstos/medidos próxima de 2 para os betões com dosagem de cimento de 125 e 175 kg/m³ e tende essa relação a aumentar para 3 a 4 nos betões com a dosagem de 75 kg/m³. Os valores de fluência determinados pelo EC2 são tendencialmente relacionados de forma direta à razão A/C e de forma inversa à dosagem de cimento. A metodologia de previsão apoia-se em modelos que não se revelam adequados a estes betões, sendo necessário aprofundar bastante este campo das deformações diferidas.

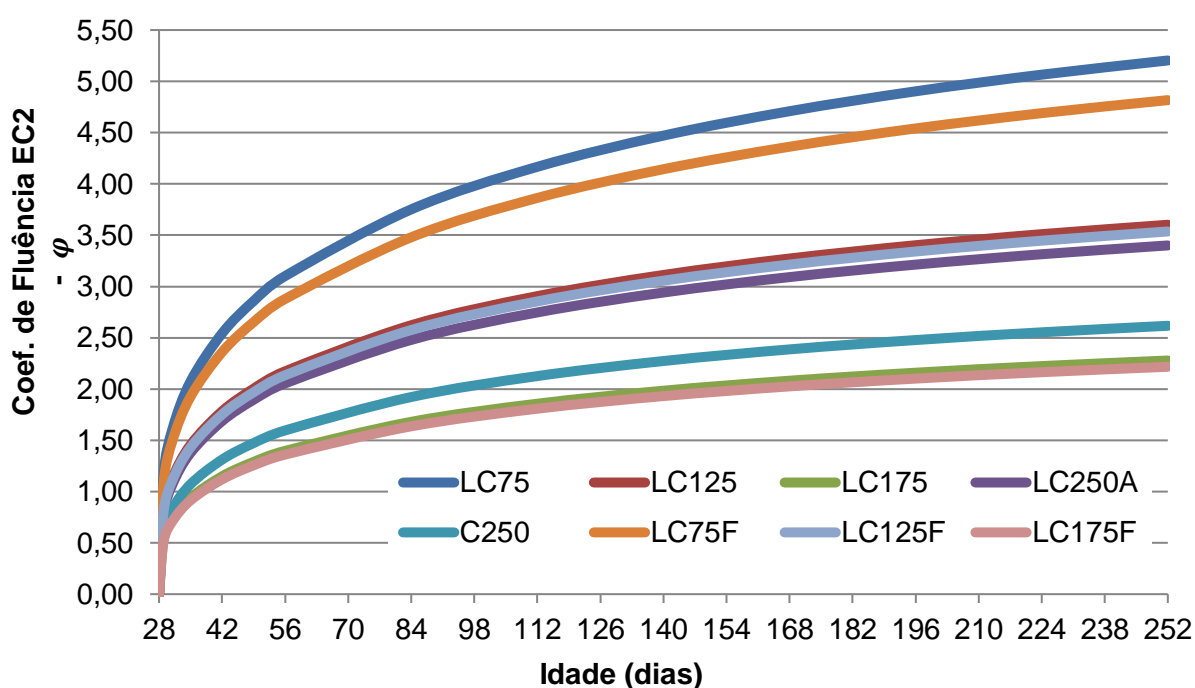


Figura 59 - Determinação do coeficiente de fluência pelo EC2.

6. Conclusões

Neste capítulo são apresentadas de forma sucinta as principais conclusões que se pode retirar de todo o estudo realizado. São ainda apresentadas sugestões de aspetos que carecem de estudos futuros.

6.1. Conclusões

Conclusões relativas ao betão no estado fresco:

- Existe um efeito benévolo das cinzas volantes no aumento da trabalhabilidade dos betões;
- Os betões formulados com a curva de Faury apresentam maior coesão apesar de terem uma consistência aparentemente mais seca;
- Os betões LC e LC_F com baixas dosagens de ligante, 250 kg/m³, apresentam trabalhabilidades inferiores às dos betões com maiores quantidades de ligante (betões designados pela sigla C, com dosagem de ligante de 350 kg/m³).

Conclusões relativas ao betão no estado endurecido:

- No ensaio de capilaridade, as misturas LC, com reduzida dosagem de ligante, têm valores de absorção de água inferiores aos betões C, com dosagem corrente de ligante. Isso deve-se ao facto de grande percentagem de água absorvida por um betão ocorrer para o interior da matriz do betão e não para o interior dos agregados.
- A absorção por capilaridade tende a aumentar com a redução da dosagem de cimento, mas a incorporação de cinzas volantes contribui aparentemente para uma diminuição da porosidade do betão. Essas reagem com os hidróxidos de cálcio, inicialmente formados pela hidratação do cimento Portland, e preenchem os espaços vazios nos poros.
- No ensaio de Imersão, os betões com compacidade superiores, os LC, absorvem menos água do que os betões com compacidade inferiores, os betões C, essencialmente devido à menor relação A/L.

- Relativamente ao ensaio de carbonatação, quanto menor é a razão A/C maior é a resistência do betão ao fenómeno de carbonatação. Quanto maior é a compacidade de um betão, menor é o valor da profundidade de carbonatação. Os betões LC, com uma compacidade de 0,86, apresentam profundidades de carbonatação inferiores aos betões C, com menor compacidade e maior relação A/L.
- Existe uma correlação aproximada entre os valores obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade e os valores da profundidade de carbonatação.
- No que respeita ao módulo de elasticidade, os betões com baixas dosagens de ligante apresentam elevados valores, em comparação ao betão de referência C250, sendo até 40% superiores à previsão do EC2, principalmente os betões formulados com a curva de Alfred.
- Quanto à retração, os betões LC, com baixa dosagem de ligante e compacidade de 0,86, apresentam valores inferiores aos dos betões com dosagem corrente de ligante e compacidade de 0,81. Além disso, a retração destes betões tende a aumentar com a dosagem de cimento. As previsões do valor de retração pelo EC2 foram superiores aos valores determinados, tendo a discrepância sido maior no caso dos betões LC.
- Na caracterização da fluência, os betões formulados pela curva de Faury apresentam valores inferiores comparativamente aos formulados pela curva de Alfred. A influência da curva de referência é superior nas primeiras idades após o carregamento e principalmente para betões com quantidades baixas de cimento; à medida que a idade e a quantidade de cimento aumenta o valor da fluência para os dois tipos de betão tende para o mesmo valor.
- O valor do coeficiente de fluência tende a aumentar com a redução da dosagem de cimento e com a redução o aumento da razão A/L. A incorporação de cinzas volantes nestes betões contribui aparentemente de forma benéfica na redução das deformações por fluência.
- Os valores de fluência previstos pelo EC2 são muito superiores aos resultados obtidos experimentalmente, cerca do dobro, com tendência a aumentar significativamente essa relação para betões com dosagens muito reduzidas de cimento e com incorporação de cinzas volantes.

6.2. Estudos futuros

De forma a dar continuidade ao desenvolvimento dos betões de baixa dosagem de cimento propõe-se como estudos futuros:

- Otimizar misturas da tipologia LC para dosagens de cimento entre 125 e 175 kg/m³, com incorporação de diferentes adições, de forma a aumentar trabalhabilidade, sendo previsível que nesta gama de dosagem de cimento se obtenham betões eco eficientes com elevados desempenhos mecânicos, diferidos e de durabilidade;
- Identificar e explorar as aplicações possíveis para os betões com reduzida dosagem de ligante com uma trabalhabilidade baixa;
- Estudar betões com dosagens reduzidas de ligante com aumento significativo de diversas adições, como forma de aumentar a trabalhabilidade e desempenho da pasta ligante.

Referências bibliográficas

- Alves, H. I. (Dezembro de 2015). *Formulação e Caracterização Mecânica de Betões com Baixa Dosagem de Cimento*.
- Broomfield, J. P. (1997). *Corrosion of steel in concrete, Understanding, Investigation and Repair* (2 ed.). London and New York: E & FN SPON.
- Camões, A., & Reis, R. (2012). Betões eco-eficientes para uma construção sustentável.
- Cóias, V. (2006). *Inspecções e Ensaio na Reabilitação de Edifícios*. Lisboa.
- Costa, A., & Appleton, J. (2002). *Estruturas de Betão I - Parte II: Materiais*. Instituto Superior Técnico.
- Costa, H. (2012). *Betões Estruturais de Agregados Leves. Aplicações em Prefabricação e Reforço de Estruturas*. Coimbra.
- Costa, H. S. (2007). *Composição e Caracterização Mecânica de Betões Estruturais de Agregados Leves*. Coimbra.
- Coutinho, A. (1973). *Fabrico e Propriedades do Betão* (Vol. I). Lisboa: LNEC.
- Coutinho, A. d. (1973). *Fabrico e Propriedades do Betão* (Vol. I). Lisboa, Portugal: LNEC.
- Coutinho, J. D. S. (1999). Argamassas e betões.
- Coutinho, J. D. S. (1999). Materiais de construção 1, Agregados para argamassas e betões.
- Coutinho, M. (2005). *Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem*. Porto, Porto: FEUP.
- D. Callister, W., & G. Rethwisch, D. (2013). *Materials Science and Engineering, An Introduction* (9 ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- E 373. (s.d.). *Inertes para argamassas e betões*. LNEC.
- E 391. (1993). *Determinação da resistência à carbonatação*. LNEC.
- E 393. (1993). *Determinação da absorção de água por capilaridade*. LNEC.
- E 394. (1993). *Determinação da absorção de água por imersão*. LNEC.
- E372. (1993). *Água de amassadura para betões, características e verificação da conformidade*. LNEC.
- E399. (1993). *Determinação da fluência em compressão*. LNEC.
- EC2. (2010). *Projeto de estruturas de betão*.

- EN934-2. (s.d.). Admixtures for concrete, mortar and grout - Part 2: Concrete admixtures - Definitions, requirements, conformity, marking and labelling. EUROPEAN STANDARD.
- F. Pacheco, T., Labrincha, J., Miraldo, S., & Brito, J. (2012). An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: Evaluation, use of SCMs and/or RAC. *Construction and Building Materials*, 141-250.
- Fennis, S. (2010). *Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimization*. Netherlands: Gildeprint.
- Fennis, S. A. A. M. (2011). *Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimization*.
- Fennis, S., & Walraven, J. (2012). *Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design*. Netherlands.
- Fennis, S. A. A. M., Walraven, J. C., & Uijl, J. A. Den. (2009). The use of particle packing models to design ecological concrete, 54(2), 185–204.
- FIB CEB-FIP . (2010). *Model Code 2010 First Complete draft, vol. 1*. Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete (fib).
- Freitas, V., Torres, M., & Guimarães, A. (2008). *Humidade Ascensional*. Porto: FEUP.
- Ghafari, E., Costa, H., & Júlio, E. (2015). Statistical mixture design approach for eco-efficient UHPC. *Elsevier Cement & Concrete Composites*, 17-25.
- Gokce, A., Beyaz, C., & Ozkan, H. (2016). Influence of fines content on durability of slag cement concrete produced with limestone sand. *Construction and Building Materials*, 111, 419–428. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.139>
- Grosogeat, B., & Colon, P. (2008). La Corrosion des Armatures des Bétons Armés et Précontraints. *Technologie*, Novembre(L).
- Kohlhaas, B. (1983). *Cement Engineers' Handbook* (4th ed.).
- Kurdowski, W. (2014). *Cemente and Concrete Chemistry*. Springer.
- Li, Z. (2011). *Advanced Concrete Technology*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Li, L. G., & Kwan, A. K. H. (2015). Adding limestone fines as cementitious paste replacement to improve tensile strength, stiffness and durability of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 60, 17–24. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.02.006>
- Luís, W. (Janeiro de 2013). Estudo do desempenho, a curto e longo da incorporação de resíduos industriais nas composições de argamassa e betões de base cimentícia.
- Newman, J., & Choo, B. (2003). *Advanced Concrete Technology, Constituent Materials*. Elsevier

Ltd.

Neville, A. . (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Trans-Atlantic Publications, Inc.

Newman, J., & Choo, B. S. (2003). *Advance Concrete Technology, Constituent Materials*. Elsevier.

NP EN 197-1 . (Abril de 2001). *Parte1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*. Instituto Português da Qualidade.

NP EN 206. (207). Lisboa: Instituto Português de Qualidade.

NP EN 450-1. (s.d.). *Cinzas volantes para betão parte 1: definição , especificações e critérios de conformidade*. Lisboa: Instituto Português de Qualidade.

NP-EN1008. (2003). *Água de amassadura para betão. Especificações para a amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria de betão, para o fabrico de betão*. Lisboa: Instituto Português de Qualidade.

NP-EN12350-2. (2002). *Ensaio de abaixamento*. Lisboa: Instituto Português de Qualidade.

NP-EN12350-4. (2002). *Grau de compactabilidade*. Lisboa: Instituto Português de Qualidade.

Page, H. (1996). Design and Control of Concrete Mixtures, EB001, (54048).

PETER C. Hewlett. (1988). *LEA's Chemistry of Cement and Concrete, Fourth edition* (Vol. 53). Elsevier. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Proske , T., Hainer, S., Rezvani, M., & Graubner, C. A. (2014). Eco-friendly concretes with reduced water and cement content – Mix. *Elsevier Construction and Building Materials*.

Sérgio, H., & Costa, S. (n.d.). Composição e Caracterização Mecânica de Betões Estruturais de Agregados Leves.

Siddiqui, M. S., Grasley, Z., & Fowler, D. W. (2016). Internal water pressure development in saturated concrete cylinder subjected to coefficient of thermal expansion tests: Poroelastic model. *Construction and Building Materials*, 112, 996–1004. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.081>

Schlumpf , J., Bicher, B., & Schwoon, O. (2003). *Sika Concrete Handbook*. Zürich: Sika Services AG.

Soroka, I. (1993). *Concrete in Hot Environments*. E & F N Spon.

Sumanasooriya, M. S., & Neithalath, N. (2011). Pore structure features of pervious concretes proportioned for desired porosities and their performance prediction. *Cement and Concrete Composites*, 33(8), 787. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.06.002>

- Thiery, M. (2005). Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires : (prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques). *Etudes et Recherches Des Laboratoires Des Ponts et Chaussées. Série Ouvrages D'art*. IFSTTAR. Retrieved from <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=18254615>
- Torgal , F., Miraldo, S., Labrincha, J., & De Brito, J. (2012). *An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: Evaluation, use of SCMs and/or RAC*. Obtido de ScienceDirect.
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. (2011). Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annu Rev Environ Resour* 26, 303-29.
- Wu, M., & Johannesson, B. (2014). Impact of sample saturation on the detected porosity of hardened concrete using low temperature calorimetry. *Thermochimica Acta*, 580, 66–78. <http://doi.org/10.1016/j.tca.2014.02.002>